



**Pedro Miguel Martins  
Pereira**

**Inversão Geoestatística de Dados Sísmicos 3D com  
Multi-distribuições Locais**



**Pedro Miguel Martins  
Pereira**

**Inversão Geoestatística de Dados Sísmicos 3D com  
Multi-distribuições Locais**

Tese apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica: recursos geológicos, realizada sob a orientação científica do Doutor Leonardo Azevedo Pereira, Investigador Auxiliar do Cerena - IST, e do Professor Doutor Luís Filipe Fuentefria de Menezes Pinheiro, Professor Associado do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro.

“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota.”

(Theodore Roosevelt)

## **o júri**

presidente

**Prof. Doutor Jorge Manuel Pessoa Girão Medina**  
Professor Auxiliar do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro

**Prof. Doutor Rui Miguel Marques Moura**  
Professor Auxiliar do Departamento de Geociências da Universidade do Porto

**Prof. Doutor Leonardo Azevedo Guerra Raposo Pereira**  
Investigador Auxiliar do Cerena no Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa

**Prof. Doutor Luís Filipe Fuentefria de Menezes Pinheiro**  
Professor Associado do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro





## **agradecimentos**

Ao longo da nossa vida, todas as etapas fulcrais acabam por ser realçadas e lembradas por algum acontecimento especial. A conclusão desta dissertação significa isso mesmo, o encerrar de uma etapa importante da minha vida.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Professor Luís Menezes Pinheiro por me ter aceite como seu orientando e de me conceder a oportunidade da realização deste trabalho científico no Instituto Superior Técnico (Universidade de Lisboa).

Foi a partir deste momento que estava em vista o começo de um novo desafio, que duraria cerca de 8 meses. Não poderia deixar de expressar o meu sincero apreço e agradecimento ao Professor Amílcar Soares e ao Leonardo Azevedo pela oportunidade de aprendizagem e desenvolvimento desta dissertação no Centro de Modelação de Reservatórios de Petróleo (CMRP) do CERENA, que se tornou numa experiência enriquecedora e aliciante na introdução aos “Mundos” da Geoestatística e da Inversão Sísmica. Na verdade, nessa altura o meu conhecimento de Geoestatística era muito superficial e tudo o que estava associado e girava à volta de Inversão Sísmica eram uma grande incógnita na minha cabeça. É aqui que entra o papel do Leonardo, que apesar de já o conhecer, não me parou de surpreender pelo seu profissionalismo na orientação, capacidade e disponibilidade de me ensinar, em tão pouco tempo, o essencial dos dois “Mundos” para a realização desta tese, que se hoje está concluída foi maioritariamente graças a ele, daí o meu profundo agradecimento. Tenho de agradecer também a todos os colegas do CERENA, em especial ao Pedro e ao Sérgio, que se mostraram sempre prontamente disponíveis no esclarecimento e superação de alguma dificuldade durante o meu trabalho.

## **agradecimentos**

Gostaria também de agradecer a todos os meus colegas e amigos que, durante todo este percurso académico, contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão desta etapa, principalmente da dissertação. Em especial, tenho de agradecer ao Daniel, ao Leandro e à Rita pela sua amizade e, resumidamente, apesar de não o serem, considero-os como irmãos por tudo o que passamos juntos e por todos os momentos durante toda esta caminhada, uma vez que esta etapa não se resumiu apenas à aquisição e aplicação de conhecimentos.

Finalmente, gostaria de agradecer todo o apoio e força que os meus pais e os meus irmãos me deram porque, de facto, sem eles todo este percurso teria sido bem mais difícil, sendo eles os principais responsáveis por ter chegado até aqui, especialmente na elaboração desta tese. Ao meu irmão, Nuno, por toda a ajuda e companheirismo dados durante todo este tempo que permaneci em Lisboa, partilhando bons momentos e inculindo-me o gosto por esta cidade. Por último, mas não menos importante, queria agradecer à minha namorada, Luciana, pela compreensão e o forte apoio que me deu, estando sempre ao meu lado, apesar do tempo que, muitas vezes, abdiquei de estar com ela, para poder finalizar todo o meu trabalho traduzido nesta dissertação. Assim, como última forma de agradecimento, gostaria de dedicar-lhes esta tese como fruto do meu empenho e dedicação.

**palavras-chave**

inversão sísmica, Inversão Estocástica Global, Inversão Elástica Global, zonalidades, impedância acústica, impedância elástica, modelação geoestatística, simulação sequencial direta.

**resumo**

Os modelos de subsuperfície inferidos a partir de dados de reflexão sísmica permitem avaliar espacialmente as propriedades petro-elásticas de reservatório (por exemplo, densidade, impedâncias acústica e elástica) que são essenciais para uma boa caracterização e modelação de reservatórios de hidrocarbonetos. Os modelos invertidos gerados a partir de metodologias geoestatísticas e da integração de dados de *logs* de poços com dados de reflexão sísmica, dentro de uma grelha de reservatório, permitem ainda avaliar e quantificar, localmente, a incerteza espacial associada. O principal objetivo desta dissertação de mestrado consiste na comparação e discussão dos diversos resultados obtidos através da aplicação de diferentes metodologias de inversão sísmica geoestatística com multi-distribuições e modelos de continuidade espacial locais, de forma a gerar modelos próximos da realidade, em condições de não-estacionaridade, que permitam uma melhor caracterização da geologia de subsuperfície. Dentro das várias aproximações de inversão geoestatística existentes, para a elaboração desta tese foram utilizadas a Inversão Estocástica Global e a Inversão Elástica Global recorrendo ao algoritmo de simulação sequencial direta para a geração dos modelos elásticos de sub-superfície. Esta tese baseia-se na realização de 6 ensaios distintos, para cada uma das metodologias de inversão referidas, segundo multi-distribuições e modelos de continuidade locais (zonalidades) previamente definidas a um conjunto de dados sintéticos altamente não estacionários. No conjunto de dados disponíveis foram integrados dados de impedâncias (acústica e elástica) de 32 poços, bem como dados de reflexão sísmica *post-stack*. Os resultados mostram que a divisão da malha do reservatório em diferentes zonas tem um grande impacto na convergência dos diferentes métodos de inversão geoestatística utilizados no âmbito desta tese.

**keywords**

Seismic inversion, Global Stochastic Inversion, Global Elastic Inversion, zones, acoustic impedance, elastic impedance, geostatistical modeling, direct sequential simulation.

**abstract**

The subsurface models inferred from seismic reflection data allow the spatial evaluation of the petro-elastic properties of the reservoir (e.g., density, elastic and acoustic impedances) that are essential for a good characterization and modeling of hydrocarbon reservoirs. The generated inverted models from geostatistical methodologies and the integration of well log data with seismic reflection data, within a reservoir grid, allow to assess and quantify, locally, the associated spatial uncertainty. The main objective of this MSc dissertation is the comparison and discussion of the results obtained from applying different geostatistical seismic inversion methodologies, with local multi-distributions and spatial continuity models, to generate models closer to reality, under non-stationarity conditions, that allow a better characterization of the subsurface geology. From the several existing geostatistical inversion approaches, for the realization of this thesis the Global Stochastic Inversion and the Global Elastic Inversion were selected, using the direct sequential simulation algorithm to generate the subsurface elastic models. This thesis is based on the realization of 6 different trials for each of the inversion methodologies, under local multi-distributions and continuity models (zonality) predefined in a highly non-stationary synthetic dataset. In the available dataset impedance (acoustic and elastic) data from 32 wells and post-stack seismic reflection data were integrated. The results show that the division of reservoir grid into different zones has high impact on the convergence of the different inversion geostatistical methods used within this thesis.



# Índice

|                                                                                                 |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Índice .....</b>                                                                             | <b>I</b>  |
| <b>Lista de Abreviaturas:.....</b>                                                              | <b>IV</b> |
| <b>Índice de Figuras:.....</b>                                                                  | <b>V</b>  |
| <b>Capítulo I: Introdução .....</b>                                                             | <b>1</b>  |
| 1.1 Motivação e abordagem ao tema.....                                                          | 3         |
| 1.2 Objetivos.....                                                                              | 4         |
| 1.3 Estrutura da dissertação.....                                                               | 5         |
| <b>Capítulo II: Conceitos Geoestatísticos: Aplicações em Ciências da Terra.....</b>             | <b>7</b>  |
| 2.1 Geoestatística: Modelação de Fenómenos Espaciais .....                                      | 9         |
| 2.1.1 Variáveis Aleatórias.....                                                                 | 9         |
| 2.1.2 Variogramas e Covariância .....                                                           | 11        |
| 2.1.3 Modelos de Variogramas.....                                                               | 12        |
| 2.1.4 Análise de Continuidade Espacial .....                                                    | 16        |
| 2.2 Inferência de Processos Naturais .....                                                      | 19        |
| 2.2.1 Estimação e Simulação .....                                                               | 19        |
| 2.2.2 Simulação Sequencial Estocástica .....                                                    | 22        |
| 2.2.3 Incerteza local e incerteza Espacial .....                                                | 24        |
| 2.2.5 Simulação e co-simulação Sequencial Directa (SSD e co-SSD).....                           | 29        |
| 2.2.6 Co-simulação Sequencial Directa com distribuições de probabilidade conjunta .             | 34        |
| <b>Capítulo III: Integração de dados de reflexão sísmica nos modelos de subsuperfície .....</b> | <b>39</b> |
| 3.1 Inversão Sísmica Geoestatística.....                                                        | 41        |
| 3.1.1 Inversão Acústica Geoestatística: Inversão Estocástica Global .....                       | 44        |

|                                                 |                                                                                                  |            |
|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.1.2                                           | Inversão Elástica Geoestatística: Inversão Elástica Global .....                                 | 46         |
| <b>Capítulo IV: Resultados .....</b>            |                                                                                                  | <b>49</b>  |
| 4.1                                             | Descrição dos Dados Originais .....                                                              | 52         |
| 4.1.1                                           | Histogramas dos Dados Originais .....                                                            | 56         |
| 4.1.2                                           | Representação da bi-distribuição entre os Dados Originais de IA e IE .....                       | 57         |
| 4.2                                             | Casos de estudo.....                                                                             | 58         |
| 4.2.1                                           | Histogramas Locais .....                                                                         | 60         |
| 4.2.2                                           | Variogramas Locais.....                                                                          | 70         |
| 4.3                                             | Ensaio com Inversão Estocástica Global (GSI) .....                                               | 71         |
| 4.3.1                                           | Modelos Sintéticos de Impedância Acústica .....                                                  | 71         |
| 4.3.2                                           | Volumes de Correlação Local entre sísmica sintética e original.....                              | 75         |
| 4.3.3                                           | Sísmica Sintética de Reflexão Post-Stack .....                                                   | 77         |
| 4.3.4                                           | Histogramas dos Modelos Sintéticos .....                                                         | 79         |
| 4.3.5                                           | Evolução dos Coeficientes de Correlação Global entre Sísmica Original e Sísmicas Sintéticas..... | 80         |
| 4.4                                             | Ensaio com Inversão Elástica Global (GEI) .....                                                  | 81         |
| 4.4.1                                           | Modelos Sintéticos de Impedâncias Acústica e Elástica .....                                      | 81         |
| 4.4.2                                           | Volumes de Correlação Local entre Sísmica Original e Sísmica Sintética.....                      | 87         |
| 4.4.3                                           | Sísmica Sintética de Reflexão Partial Post-Stack.....                                            | 91         |
| 4.4.4                                           | Histogramas dos Modelos Sintéticos de Impedância Acústica e Elástica .....                       | 96         |
| 4.4.5                                           | Bi-distribuição entre os melhores pares IA e IE de cada ensaio .....                             | 98         |
| 4.4.6                                           | Evolução dos Coeficientes de Correlação global entre Sísmicas Sintéticas e Sísmica Original..... | 99         |
| <b>Capítulo V: Discussão e Conclusões .....</b> |                                                                                                  | <b>101</b> |



|                                                     |                                                                                                  |            |
|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.1                                                 | Comparação e discussão da evolução dos coeficientes de correlação global entre ensaios GSI ..... | 103        |
| 5.2                                                 | Comparação e discussão da evolução dos coeficientes de correlação global entre ensaios GEI ..... | 111        |
| 5.3                                                 | Comparação e discussão de resultados entre os métodos geoestatísticos GSI e GEI .....            | 119        |
| 5.4                                                 | Conclusões Finais e Sugestões de Trabalho Futuro .....                                           | 123        |
| <b>Referências Bibliográficas .....</b>             |                                                                                                  | <b>127</b> |
| <b>Anexos.....</b>                                  |                                                                                                  | <b>131</b> |
| Anexo I – Variogramas das Zonas: Ensaios GSI.....   |                                                                                                  | 133        |
| Anexo II – Variogramas das Zonas: Ensaios GEI ..... |                                                                                                  | 137        |

## Lista de Abreviaturas:

**IA / AI:** Impedância acústica

**IE / EI:** Impedância elástica

**SSD:** Simulação sequencial direta

**co-SSD:** Co-simulação sequencial direta

**GSI:** Inversão estocástica global

**GEI:** Inversão elástica global

**CC:** Coeficiente de correlação

**Fdp:** Função de distribuição de probabilidades

**Fdc:** Função de distribuição cumulativa

**VA:** Variável aleatória

## Índice de Figuras:

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Representação gráfica de um variograma segundo um modelo esférico com um determinado patamar e valor de amplitude.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 13 |
| Figura 2: Representação gráfica de um variograma segundo um modelo exponencial com um determinado patamar e valor de amplitude.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 14 |
| Figura 3: Representação gráfica de um variograma segundo um modelo Gaussiano com um determinado patamar e valor de amplitude.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 14 |
| Figura 4: Comparação entre um modelo resultante de um processo de estimação por Krigagem (canto superior esquerdo) com três diferentes realizações, para velocidades das ondas P. Os dados experimentais utilizados no processo de modelação foram os mesmos para os quatro modelos, estando localizados e representados pelos círculos preenchidos pretos. A variabilidade dos modelos simulados é muito maior quando comparada com os modelos interpolados pelo processo de Krigagem (retirado de Azevedo, 2013)..... | 21 |
| Figura 5: Modelos de variogramas com as direções N-S (0;0), E-W (90;0) e vertical (0;90), referentes a um modelo de impedância acústica simulado (à esquerda). Os dados dos <i>logs</i> dos poços, que condicionaram o modelo referido, estão representados pelos modelos de variogramas com as direções N-S, E-W e vertical (à direita). ....                                                                                                                                                                          | 23 |
| Figura 6: Representação dos histogramas (função de distribuição de probabilidades) estimados a partir dos dados de <i>log</i> dos poços (à esquerda) e do modelo de impedância acústica simulado (à direita) referido na Figura 5. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 23 |
| Figura 7: Seções verticais extraídas do modelo original (dos dados de <i>logs</i> dos poços) de impedância acústica (topo) e do modelo de impedância acústica simulado (base) referido na Figura 5. A seção vertical do modelo de IA simulado honra e reproduz os dados de <i>logs</i> dos poços e a sua localização. ....                                                                                                                                                                                              | 24 |
| Figura 8: Representação esquemática realçando a estimação de valores, em localizações sem informação, numa determinada superfície. Nas áreas longe dos poços, existe uma maior incerteza espacial associada ao valor estimado, em comparação com localizações perto dos poços, onde a incerteza espacial associada é muito menor (adaptado de Francis, 2006). ....                                                                                                                                                      | 25 |
| Figura 9: Representação esquemática do princípio da simulação sequencial, numa grelha 2D. Os círculos pretos preenchidos representam os dados experimentais disponíveis. Os círculos azuis preenchidos correspondem às células previamente simuladas da grelha, ao longo de um caminho aleatório representado pelas setas a tracejado. O valor da célula $z_7$ corresponde à localização da grelha onde a simulação está a ser realizada (adaptado de Azevedo, 2013). ....                                              | 27 |
| Figura 10: Geração de um valor ( $z_1$ ), a partir de uma variável ( $F_{z_1}$ ) utilizando a metodologia da transformada inversa: definição de um valor aleatório $u$ a partir de uma distribuição uniforme no intervalo [0,1]; cálculo do valor simulado correspondente, $z_1$ , através de $z_1 = F_{z_1}^{-1}(u)$ (adaptado de Azevedo, 2013). ....                                                                                                                                                                 | 28 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 11: Representação gráfica da re-amostragem da função de distribuição de probabilidades $F_z(z)$ por intervalos definidos pela média local e variância de $z(x_u)$ . O valor $y(x_u)^*$ corresponde ao estimador local $z(x_u)^*$ . O valor simulado $z(x_u)^*$ é calculado a partir do intervalo de $F_z(z)$ definido por $G(y(x_u)^*, \sigma^2_{sk}(x_u))$ (adaptado de Soares, 2001).                                                                       | 31 |
| Figura 12: Distribuições conjuntas, estimadas a partir de dados de <i>log</i> dos poços (à esquerda), resultantes das bi-distribuições entre os modelos co-simulados com a utilização da co-SSD (ao centro) e da co-simulação com distribuições conjuntas de probabilidades (à direita). A utilização do último método permite a reprodução, nos modelos simulados, das bi-distribuições estimadas pelos dados de <i>logs</i> dos poços (retirado de Azevedo, 2013). | 36 |
| Figura 13: Seções verticais de um determinado modelo de velocidades de ondas P, comparando o modelo co-simulado através da SSD (topo) e da SSD com distribuições conjuntas de probabilidades (base). As bi-distribuições entre a variável secundária e a variável primária, relativamente às duas metodologias de co-simulação, estão representadas na Figura 12 (retirado de Azevedo, 2013).                                                                        | 37 |
| Figura 14: Representação esquemática do fluxograma da metodologia de Inversão Estocástica Global – GSI (retirado de Azevedo, 2013).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 46 |
| Figura 15: Representação esquemática do fluxograma da metodologia de Inversão Elástica Global – GEI (retirado de Azevedo, 2013).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 48 |
| Figura 16: Procedimento de apresentação dos resultados sintéticos obtidos e comparação com os dados originais, relativamente à metodologia de inversão sísmica GSI.                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 52 |
| Figura 17: Procedimento de apresentação dos resultados sintéticos obtidos e comparação com os dados originais, relativamente à metodologia de inversão sísmica GEI.                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 52 |
| Figura 18: Representação dos poços utilizados através das vistas de perfil e topo dos modelos originais de impedância acústica (topo) e de impedância elástica (base).                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 53 |
| Figura 19: Representação dos resultados do <i>upscaling</i> nos poços utilizados, através dos modelos originais de impedância acústica (topo) e de impedância elástica (base).                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 54 |
| Figura 20: Representação do modelo de sísmica original de reflexão <i>post-stack</i> ( <i>seis_real</i> ) utilizado durante o processo de inversão, na metodologia geoestatística GSI.                                                                                                                                                                                                                                                                               | 54 |
| Figura 21: Representação dos modelos de sísmica original de reflexão <i>partial post-stack</i> : <i>AVA_0_10_86</i> , <i>AVA_10_20_86</i> , <i>AVA_20_30_86</i> e <i>AVA_30_40_86</i> , segundo os ângulos parciais médios 5°, 15°, 25° e 35°, respetivamente, utilizados durante o processo de inversão, na metodologia geoestatística GEI.                                                                                                                         | 55 |
| Figura 22: Representação do conjunto de poços disponível e a sua localização dentro da grelha 101x101x90. A linha roxa corresponde à localização das seções verticais, utilizadas na apresentação de resultados a fim de comparação entre os dados originais e os dados sintéticos.                                                                                                                                                                                  | 56 |
| Figura 23: Representação dos histogramas originais de impedância acústica (esquerda) e impedância elástica (direita).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 57 |
| Figura 24: Representação da bi-distribuição (distribuição conjunta) entre os dados originais de impedância acústica (IP86) e impedância elástica (IS86).                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 58 |

|                                                                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 25: Divisão por zonalidades dos seis ensaios realizados, para as metodologias de inversão GSI e GEI. ....                                                                                              | 59 |
| Figura 26: Histogramas das zonas globais relativos às propriedades de impedâncias acústica e elástica do ensaio 1.....                                                                                        | 61 |
| Figura 27: Histogramas das três zonas e respetivo histograma global relativos à propriedade de impedância acústica do ensaio 2. ....                                                                          | 61 |
| Figura 28: Histogramas das três zonas e respetivo histograma global relativos à propriedade de impedância elástica do ensaio 2. ....                                                                          | 62 |
| Figura 29: Histogramas das três zonas e respetivo histograma global relativos à propriedade de impedância acústica do ensaio 3. ....                                                                          | 63 |
| Figura 30: Histogramas das três zonas e respetivo histograma global relativos à propriedade de impedância elástica do ensaio 3. ....                                                                          | 64 |
| Figura 31: Histogramas das duas zonas e respetivo histograma global relativos à propriedade de impedância acústica do ensaio 4. ....                                                                          | 65 |
| Figura 32: Histogramas das duas zonas e respetivo histograma global relativos à propriedade de impedância elástica do ensaio 4. ....                                                                          | 65 |
| Figura 33: Histogramas das quatro zonas e respetivo histograma global relativos à propriedade de impedância acústica do ensaio 5. ....                                                                        | 66 |
| Figura 34: Histogramas das quatro zonas e respetivo histograma global relativos à propriedade de impedância elástica do ensaio 5. ....                                                                        | 67 |
| Figura 35: Histogramas das nove zonas e respetivo histograma global relativos à propriedade de impedância acústica do ensaio 6. ....                                                                          | 68 |
| Figura 36: Histogramas das nove zonas e respetivo histograma global relativos à propriedade de impedância elástica do ensaio 6. ....                                                                          | 69 |
| Figura 37: Representação do modelo original de impedância acústica (topo) e dos melhores modelos de IA dos seis ensaios GSI. ....                                                                             | 72 |
| Figura 38: Representação da seção vertical do modelo original de IA e das seções verticais dos melhores modelos sintéticos dos ensaios GSI (ver Figura 22 para localização da seção vertical). ....           | 74 |
| Figura 39: Representação dos volumes de correlação local entre a sísmica original e as sísmicas sintéticas dos seis ensaios GSI.....                                                                          | 75 |
| Figura 40: Representação das seções verticais dos volumes de correlação local entre a sísmica original e as sísmicas sintéticas dos seis ensaios GSI (ver Figura 22 para localização da seção vertical). .... | 76 |
| Figura 41: Representação da seção vertical da sísmica <i>post-stack</i> original e das seções verticais das sísmicas sintéticas dos seis ensaios GSI (ver Figura 22 para localização da seção vertical). .... | 78 |
| Figura 42: Representação do histograma original de IA e dos histogramas dos melhores modelos sintéticos de IA dos ensaios GSI.....                                                                            | 79 |
| Figura 43: Representação da evolução dos coeficientes de correlação global entre sísmica original e sísmicas sintéticas dos seis ensaios GSI. ....                                                            | 80 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 44: Representação do modelo original de impedância acústica (topo) e dos melhores modelos de IA dos seis ensaios GEI. ....                                                                                                                              | 82  |
| Figura 45: Representação da seção vertical do modelo original de IA e das seções verticais dos melhores modelos sintéticos dos ensaios GEI (ver Figura 22 para localização da seção vertical) .....                                                            | 83  |
| Figura 46: Representação do modelo original de impedância elástica (topo) e dos melhores modelos de IE dos seis ensaios GEI. ....                                                                                                                              | 85  |
| Figura 47: Representação da seção vertical do modelo original de IE e das seções verticais dos melhores modelos sintéticos dos ensaios GEI (ver Figura 22 para localização da seção vertical). .....                                                           | 86  |
| Figura 48: Representação dos volumes de correlação local entre a sísmica original e as sísmicas sintéticas dos seis ensaios GEI, referentes à propriedade de impedância acústica (IA). ....                                                                    | 87  |
| Figura 49: Representação das seções verticais dos volumes de correlação local entre a sísmica original e as sísmicas sintéticas dos seis ensaios GEI, referentes à propriedade de impedância acústica (ver Figura 22 para localização da seção vertical). .... | 88  |
| Figura 50: Representação dos volumes de correlação local entre a sísmica original e as sísmicas sintéticas dos seis ensaios GEI, referentes à propriedade de impedância elástica (IE). ....                                                                    | 89  |
| Figura 51: Representação das seções verticais dos volumes de correlação local entre a sísmica original e as sísmicas sintéticas dos seis ensaios GEI, referentes à propriedade de impedância elástica (ver Figura 22 para localização da seção vertical). .... | 90  |
| Figura 52: Representação da seção vertical da sísmica <i>partial post-stack</i> AVA_0_10_86 original e das seções verticais das sísmicas sintéticas dos seis ensaios GEI (ver Figura 22 para localização da seção vertical). ....                              | 92  |
| Figura 53: Representação da seção vertical da sísmica <i>partial post-stack</i> AVA_10_20_86 original e das seções verticais das sísmicas sintéticas dos seis ensaios GEI (ver Figura 22 para localização da seção vertical). ....                             | 93  |
| Figura 54: Representação da seção vertical da sísmica <i>partial post-stack</i> AVA_20_30_86 original e das seções verticais das sísmicas sintéticas dos seis ensaios GEI (ver Figura 22 para localização da seção vertical). ....                             | 94  |
| Figura 55: Representação da seção vertical da sísmica <i>partial post-stack</i> AVA_30_40_86 original e das seções verticais das sísmicas sintéticas dos seis ensaios GEI (ver Figura 22 para localização da seção vertical). ....                             | 95  |
| Figura 56: Representação do histograma original de IA e dos histogramas dos melhores modelos sintéticos de IA dos ensaios GEI.....                                                                                                                             | 96  |
| Figura 57: Representação do histograma original de IE e dos histogramas dos melhores modelos sintéticos de EI dos ensaios GEI.....                                                                                                                             | 97  |
| Figura 58: Representação da bi-distribuição entre os dados de poço originais de IA e EI (topo) e os pares dos melhores modelos sintéticos de IA e IE. ....                                                                                                     | 98  |
| Figura 59: Representação da evolução dos coeficientes de correlação global entre sísmica original e sísmicas sintéticas dos seis ensaios GEI. ....                                                                                                             | 100 |

|                                                                                                                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 60: Representação gráfica da evolução dos coeficientes de correlação global relativos à repetição de corridas do ensaio 1 do método GSI.....                              | 104 |
| Figura 61: Representação gráfica da evolução dos coeficientes de correlação global relativos à repetição de corridas do ensaio 2 do método GSI.....                              | 105 |
| Figura 62: Representação gráfica da evolução dos coeficientes de correlação global relativos à repetição de corridas do ensaio 3 do método GSI.....                              | 106 |
| Figura 63: Representação gráfica da evolução dos coeficientes de correlação global relativos à repetição de corridas do ensaio 4 do método GSI.....                              | 107 |
| Figura 64: Representação gráfica da evolução dos coeficientes de correlação global relativos à repetição de corridas do ensaio 5 do método GSI.....                              | 108 |
| Figura 65: Representação gráfica da evolução dos coeficientes de correlação global relativos à repetição de corridas do ensaio 6 do método GSI.....                              | 109 |
| Figura 66: Representação gráfica da evolução dos coeficientes de correlação global relativos aos ensaios médios do método GSI.....                                               | 110 |
| Figura 67: Representação gráfica da evolução dos coeficientes de correlação global relativos à repetição de corridas do ensaio 1 do método GEI.....                              | 112 |
| Figura 68: Representação gráfica da evolução dos coeficientes de correlação global relativos à repetição de corridas do ensaio 2 do método GEI.....                              | 113 |
| Figura 69: Representação gráfica da evolução dos coeficientes de correlação global relativos à repetição de corridas do ensaio 3 do método GEI.....                              | 114 |
| Figura 70: Representação gráfica da evolução dos coeficientes de correlação global relativos à repetição de corridas do ensaio 4 do método GEI.....                              | 115 |
| Figura 71: Representação gráfica da evolução dos coeficientes de correlação global relativos à repetição de corridas do ensaio 5 do método GEI.....                              | 116 |
| Figura 72: Representação gráfica da evolução dos coeficientes de correlação global relativos à repetição de corridas do ensaio 6 do método GEI.....                              | 117 |
| Figura 73: Representação gráfica da evolução dos coeficientes de correlação global relativos aos ensaios médios do método GEI.....                                               | 118 |
| Figura 74: Comparação entre o histograma do modelo original de IA e os histogramas relativos aos dois melhores modelos dos ensaios GSI e GEI.....                                | 121 |
| Figura 75: Comparação entre o modelo original de IA e os modelos simulados relativos aos dois melhores modelos dos ensaios GSI e GEI.....                                        | 122 |
| Figura 76: Comparação entre a seção vertical do modelo original de IA e as seções verticais dos modelos simulados relativos aos dois melhores modelos dos ensaios GSI e GEI..... | 123 |





# **Capítulo I:**

## **Introdução**



## 1.1 Motivação e abordagem ao tema

As ferramentas tecnológicas e informáticas têm, durante os últimos anos, evoluído significativamente nas diversas áreas científicas, não sendo a indústria petrolífera exceção. A caracterização e modelação de reservatórios petrolíferos têm sido áreas com grande impacto, onde o interesse na otimização de diferentes técnicas de investigação, produção e controlo obrigam a essa constante evolução tecnológica. Isto deve-se ao facto de as profundidades de exploração serem cada vez maiores e os reservatórios se apresentarem cada vez mais inacessíveis. A elevada complexidade da geologia de subsuperfície e a falta de informação sobre os reservatórios, nestas condições em profundidade, transformam todos os processos inerentes à indústria petrolífera, em desafios crescentes associados a uma elevada incerteza e risco.

As técnicas de modelação e inversão geoestatística contribuem cada vez mais para uma melhor caracterização de reservatórios de hidrocarbonetos. Existem diversas técnicas de modelação que permitem aceder a diferentes níveis de detalhe na caracterização do modelo de reservatório; contudo e independentemente da técnica utilizada, haverá sempre um grau de incerteza associada aos modelos inversos que é necessário avaliar (Azevedo, 2013). Os diferentes modelos obtidos através das diversas metodologias de inversão integram, assim, os dados de *logs* dos poços disponíveis e os dados de reflexão sísmica. Os dados de reflexão sísmica abrangem uma extensa área apesar de com resolução relativamente baixa, ao contrário dos poços que apresentam uma elevada resolução vertical mas carácter apenas pontual, o que permite diminuir a incerteza espacial ao longo do modelo, em particular nas áreas mais distantes dos poços disponíveis. No entanto, haverá sempre um elevado grau de incerteza devido às características intrínsecas do problema de inversão sísmica: não-linearidade, solução não-única, ao facto de os dados de reflexão sísmica serem medições indiretas da geologia de subsuperfície e ao facto das dificuldades na integração dos dois tipos de dados (sísmicos e de poços) por apresentarem escalas e suportes diferentes (Azevedo, 2013).

Como foi referido anteriormente, a geologia de subsuperfície é muito complexa, particularmente se os reservatórios se encontrarem em profundidades bastante elevadas. Independentemente das metodologias de inversão estocástica utilizadas, tradicionalmente, a perturbação dos modelos simulados é condicionada por distribuições globais dos dados de *logs* dos poços, relativos à propriedade de interesse em modelar, e por modelos globais de continuidade espacial. No âmbito desta dissertação, foram impostos diferentes modelos de

continuidade espacial, traduzidos pela representação de variogramas, através de multi-distribuições locais; isto é, os modelos inversos foram perturbados localmente consoante o critério (zonalidade) aplicado em cada ensaio realizado. Uma vez que a geologia estratigráfica e estrutural da subsuperfície, nos casos reais, é desconhecida e tendo em conta que a área de estudo é heterogénea e provavelmente pouco estacionária, a divisão em diversas distribuições locais pode tornar os modelos simulados relativamente mais próximos da realidade. A simulação de modelos, através do condicionamento de multi-distribuições locais, poderá fornecer uma melhor e mais fiável contribuição na aproximação das áreas de estudo reais, diminuindo, localmente a incerteza espacial, e na caracterização de zonas de reservatórios, aspetos a realçar e a ter em conta na tomada de decisões, de forma a minimizar os riscos.

### 1.2 Objetivos

A elaboração desta dissertação de mestrado tem como principal objetivo a caracterização do comportamento de modelos, cujas propriedades e elementos estatísticos globais são muito heterogéneos (não-estacionários) lateral e verticalmente, com seis diferentes critérios de zonalidade entre si, de forma a gerar divisões mais homogéneas (estacionárias). A divisão em diferentes zonas permite admitir localmente momentos estatísticos de estacionaridade distintos, o que não é verificado se toda a área de estudo for considerada globalmente.

Para cada um dos critérios zonais, utilizaram-se duas metodologias de inversão geoestatística, condicionadas por multi-distribuições locais e modelos de continuidade locais, a fim de comparar e discutir os resultados obtidos, sintetizados da seguinte forma:

- Comparação dos resultados obtidos dos seis ensaios realizados, segundo os critérios previamente definidos, com os dados originais, através da utilização do método geoestatístico GSI (Global Stochastic Inversion).
- Comparação dos resultados obtidos dos seis ensaios realizados, segundo os critérios previamente definidos, com os dados originais, através da utilização do método geoestatístico GEI (Global Elastic Inversion).
- Comparação entre as duas metodologias geoestatísticas GSI e GEI, através da análise dos resultados obtidos dos dois melhores ensaios, relativamente a cada um dos métodos de inversão utilizados.

Os resultados sintéticos obtidos foram comparados com os dados originais, para cada ensaio, a nível de: modelos de IA (Impedância Acústica) e de IE (Impedância Elástica), análise univariada (histogramas), análise bivariada (distribuições conjuntas de IA e IE) e dados de reflexão sísmica, juntamente com os respetivos modelos de correlação local (entre sísmica original e sintética). Os ensaios de cada método geoestatístico foram também comparados a nível de evolução de coeficientes de correlação global, entre a sísmica original e sintética, durante os processos iterativos.

No desenvolvimento desta tese, utilizaram-se várias ferramentas informáticas. De forma sequencial, utilizou-se o *software* de modelação geoestatística *geoMS* (CERENA/IST) para a modelação dos variogramas dos dados de *logs* dos poços; as duas metodologias geoestatísticas de inversão sísmica foram executadas através do *software Matlab* e, por fim, utilizou-se o *Petrel®* (*Schlumberger*) para visualização dos resultados obtidos (modelos, histogramas e secções verticais).

### **1.3 Estrutura da dissertação**

Esta dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos, de acordo com o trabalho de consulta bibliográfica e desenvolvimentos teóricos e práticos (experimentais).

O Capítulo 1 consiste numa breve introdução e enquadramento da evolução da modelação geoestatística na indústria petrolífera e numa abordagem às técnicas de inversão sísmica relativas ao tema desenvolvido nesta tese. Antes da apresentação da estrutura desta dissertação, são também apresentados os objetivos definidos e atingidos ao longo do desenvolvimento deste trabalho científico.

O Capítulo 2 introduz os fundamentos teóricos necessários na elaboração desta tese, sobre conceitos geoestatísticos e algoritmos de simulação e co-simulação estocástica, tendo como base o algoritmo de simulação sequencial direta (Soares, 2001).

O Capítulo 3 apresenta uma introdução à inversão sísmica geoestatística descrevendo a metodologia e conceitos gerais da inversão geoestatística. Neste capítulo são descritos também os procedimentos de duas metodologias geoestatísticas de inversão sísmica – Inversão Estocástica Global e Inversão Elástica Global – utilizadas na realização da tese.

O Capítulo 4 engloba todos os resultados obtidos durante o todo o desenvolvimento prático desta dissertação. Inclui também uma introdução descritiva dos ensaios realizados, bem como uma apresentação dos dados originais a serem comparados e discutidos no capítulo seguinte (Capítulo 5).

Por fim e como último capítulo desta tese, o Capítulo 5 apresenta as comparações e discussões dos ensaios realizados, dentro de cada metodologia de inversão sísmica utilizada, e entre as duas próprias metodologias, bem como as principais conclusões desta dissertação e sugestões de trabalho futuro.

Esta tese inclui ainda, na seção dos Anexos (Anexos I e II), os modelos de continuidade espacial locais (variogramas) referentes a cada uma das metodologias geoestatísticas de inversão sísmica.

**Capítulo II:**  
**Conceitos**  
**Geoestatísticos:**  
**Aplicações em Ciências**  
**da Terra**





## 2.1 Geoestatística: Modelação de Fenómenos Espaciais

A geoestatística nasceu da necessidade de modelação de recursos geológicos, permitindo a caracterização da dispersão espacial e espaço-temporal das grandezas que definem a quantidade e a qualidade de fenómenos naturais, em que os atributos apresentam uma determinada estrutura no espaço e/ou no tempo (Soares, 2006). As metodologias geoestatísticas são aplicadas nos mais variados domínios das Ciências da Terra e do Ambiente. Consistem num conjunto de instrumentos estatísticos que quantificam a continuidade espacial da grandeza em estudo em modelos de interpolação espacial, baseando-se na sua maior ou menor variabilidade estrutural e em modelos de simulação estocástica que avaliam o grau de incerteza associada ao fenómeno espacial (Soares, 2006).

### 2.1.1 Variáveis Aleatórias

Uma variável aleatória (VA) pode ser definida como uma variável que engloba todos os valores contemplados numa determinada função de distribuição de probabilidades (fdp; Goovaerts, 1997; Doyen, 2007; *in* Azevedo, 2013). As variáveis aleatórias podem ser de dois tipos: discretas (ou categóricas), se o número possível de resultados das VA for finito e sem qualquer ordem específica; ou contínuas, se o número de resultados apresentar uma variação contínua e uma ordenação natural (Goovaerts, 1997; Azevedo, 2013).

De acordo com o conceito de VA, o valor de uma determinada propriedade (por exemplo impedância acústica, impedância elástica) numa dada localização inserida na área de estudo (neste caso, a grelha de reservatório) é interpretado como uma realização  $z(x_1)$ , da variável aleatória  $Z(x_1)$ . Considerando as realizações de  $N$  variáveis aleatórias  $Z(x_1)$ ,  $Z(x_2), \dots, Z(x_N)$ , correlacionadas entre si e localizadas por exemplo ao longo da grelha de reservatório, o conjunto destas VA dependentes é definido como o campo (ou espaço) aleatório (Goovaerts, 1997; Soares, 2006; Doyen, 2007; *in* Azevedo, 2013).

Toda a geoestatística baseia-se na assunção de estacionaridade do fenómeno dentro da área de estudo pré-definida, permitindo a utilização da maioria das técnicas geoestatísticas usadas na inferência dos parâmetros do modelo em localizações longe dos dados experimentais (Goovaerts, 1997; Azevedo, 2013). Dentro de uma determinada área limitada e assumindo estacionaridade, pode-se considerar que todas as variáveis aleatórias têm uma média constante (Azevedo, 2013).

Para modelar um processo estocástico de forma conveniente, não é necessário fazer uma caracterização de todas as variáveis aleatórias associadas e das suas respectivas distribuições multivariadas. De forma mais simplificada, dependente de algumas suposições definidas *a priori* e referidas anteriormente, é somente necessário descrever alguns parâmetros como a média (Equação 1) e a variância (Equação 2), de forma a permitir a caracterização espacial de uma dada propriedade (Soares, 2006; *in* Azevedo, 2013):

$$E\{Z(x_i)\} = m(x_i) = \int_{-\infty}^{+\infty} z dF_{x_i}(z) \quad \text{Equação 1}$$

$$var\{Z(x_i)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} [z - m(x_i)]^2 dF_{x_i}(z) \quad \text{Equação 2}$$

em que  $F_{x_i}(z)$  é a função de distribuição de probabilidades de uma determinada variável aleatória  $Z(x_i)$ .

Considerando duas determinadas variáveis aleatórias, definidas como  $Z(x_1)$  e  $Z(x_2)$ , a covariância (Equação 3) entre ambas as variáveis é dada pela seguinte expressão (Soares, 2006).

$$C(Z(x_1), Z(x_2)) = E\{Z(x_1)Z(x_2)\} - m(x_1)m(x_2) \quad \text{Equação 3}$$

Com (Equação 4),

$$E\{Z(x_1), Z(x_2)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} xy d^2 F_{x_1 x_2}(x, y) \quad \text{Equação 4}$$

sendo  $F_{x_1, x_2}(x, y)$  a função de distribuição de probabilidades bivariada (Equação 5).

$$F_{x_1 x_2}(x, y) = \text{prob}\{Z(x_1) < x \text{ e } Z(x_2) < y\} \quad \text{Equação 5}$$

O modelo de variograma é uma forma de descrever a correlação espacial entre duas VA, onde o variograma experimental entre ambas as variáveis pode ser calculado através da seguinte equação (Equação 6) (Soares, 2006; Azevedo, 2013):

$$\gamma(Z(x_1), Z(x_2)) = E\{[Z(x_1) - Z(x_2)]^2\} \quad \text{Equação 6}$$

### 2.1.2 Variogramas e Covariância

Em Geoestatística, o variograma (ou semi-variograma) descreve a relação espacial entre pontos de um determinado atributo  $Z(x)$ , ou seja; é um instrumento de continuidade espacial sendo utilizado com o fim de representar quantitativamente a variação de um fenómeno (variáveis de interesse) regionalizado no espaço (Huijbregts, 1975, *in* Soares, 2006).

É uma função intrínseca que reflete a estrutura do fenómeno estudado, medindo as relações estatísticas – pelas covariâncias – que existem entre as amostras espaçadas de sucessivos valores de  $h$ . É uma função crescente em que, os valores do eixo das abcissas, variam até um determinado valor de  $h$ , valor este conhecido por amplitude do variograma (Soares, 2006).

Os variogramas que têm patamar (*sill*) são provenientes de Variáveis Regionalizadas (VR) Estacionárias; caso contrário, provêm de VR Intrínsecas mas não Estacionárias. Note-se que o fenómeno pode contudo ser estacionário em sub-regiões da área de estudo.

A principal diferença entre variograma e covariância é o facto de o variograma comportar classes de funções mais ricas e abrangentes do que a covariância, aumentando assim o campo de modelos possíveis (Soares, 2006).

O estimador do variograma (Equação 7) fornece informação sobre a continuidade espacial de  $Z(x+h)$ , para vários valores de  $h$ , sendo necessário ter em conta, durante o cálculo deste estimador, que a sua representatividade na região  $A$  (região em estudo) seja determinada pela dimensão de  $h$ . O estimador da covariância centrada (Equação 8) faculta a informação da continuidade espacial pela média dos produtos  $Z(x)Z(x+h)$ . Estes estimadores são as medidas geoestatísticas mais utilizadas, que representam a correlação entre  $Z_\alpha$  e  $Z_{\alpha+h}$ , podendo ser calculadas através das seguintes expressões (Soares, 2006):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[Z(x) - Z(x+h)]^2 \quad \text{Equação 7}$$

$$C(h) = E\{Z(x)Z(x+h)\} - E\{Z(x)\} E\{Z(x+h)\} \quad \text{Equação 8}$$

A forma normalizada da covariância, designadamente por estimador do correlograma, pode ser definida a partir da relação entre a covariância e o variograma (Equação 9):

$$\gamma(h) = C(0) - C(h)$$

**Equação 9**

Os variogramas normalmente são anisotrópicos, podendo ser também ser isotrópicos, representando um diferente comportamento de correlação espacial tanto em diferentes direções como com a variação da distância  $h$ . Esta diferença no comportamento é bem representativa (na maioria dos casos) quando se relacionam variogramas de direções horizontais, com variogramas de direções verticais, dependendo obviamente da variável ou elemento geológico em estudo.

Por exemplo, uma determinada camada geológica, deverá apresentar distribuições espaciais muito mais definidas e melhor representadas nos variogramas de direções horizontais comparativamente com os variogramas de direção vertical (Soares, 2006). O fenómeno contrário verifica-se no caso de poços, em que o variograma de direção vertical apresenta uma melhor distribuição espacial, uma vez que se obtém um maior número de valores de amostras ao longo do comprimento vertical dos poços, do que em qualquer direção horizontal.

Uma vez que o variograma é uma função crescente, à medida que o módulo de  $h$ ,  $|h|$ , aumenta, a variação média entre pares de amostras tende a aumentar também, até atingir o alcance, distância a partir da qual deixa de ocorrer esse aumento e a função começa a estabilizar. Ao utilizar-se o variograma nas principais direções, é possível calcular as dimensões médias dos corpos ao longo das respetivas direções (Soares, 2006).

### **2.1.3 Modelos de Variogramas**

Uma vez obtidos os valores de um conjunto de amostras de uma determinada região  $A$ , criando assim um variograma experimental, é necessário ajustar aos dados a um modelo teórico, ou seja, passar à modelização dos dados através de uma função matemática geral que represente a continuidade espacial da variável  $Z(x)$  (Soares, 2006).

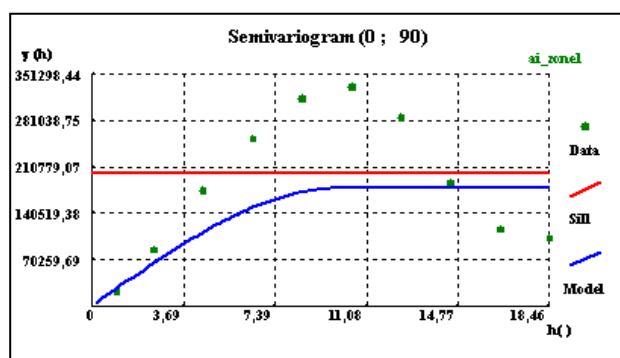
Esta etapa revela-se bastante importante na medida em que se sintetiza as características estruturais do fenómeno espacial em estudo, nomeadamente as anisotropias e grau de continuidade (entre outras), de modo a convergir num modelo coerente de variograma (Soares, 2006).

A prática geoestatística de modelização limita-se à utilização de um conjunto restrito de funções que abrange a generalidade das situações de dispersão dos fenómenos espaciais; isto é, dentro de um vasto leque de funções que podem entrar na interpolação dos pontos experimentais de um variograma, é necessário selecionar as que melhor se adequem a cada caso mas essencialmente as que respeitem certas condições (nomeadamente a positividade dos modelos) e as que possam fornecer soluções estáveis. Para tal, os variogramas e covariâncias têm de ser definidos positivos (Soares, 2006).

Esta condição de positividade dos modelos restringe, logo à partida, a escolha de funções possíveis para interpolação das amostras dos variogramas, passando a ser utilizadas para este efeito as funções definidas positivas. Os modelos teóricos de variogramas mais utilizados são os seguintes: modelo esférico, exponencial, Gaussiano e de potência. Dos quatro modelos, à exceção do modelo de potência (que não apresenta um patamar definido), todos eles apresentam funções de dois parâmetros, sendo eles um patamar,  $C$ , e uma amplitude,  $a$ , do variograma (Figura 1).

O modelo esférico (Figura 1) é considerado um dos modelos mais utilizados na modelização de variogramas, em geoestatística, sendo caracterizado por apresentar um crescimento rápido junto à origem (essencialmente para pequenas amplitudes). Este modelo é traduzido pela expressão (Equação 10):

$$\gamma(h) = \begin{cases} C \left[ 1.5 \frac{h}{a} - 0.5 \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right] & \text{para } h \leq a \\ C & \text{para } h > a \end{cases} \quad \text{Equação 10}$$



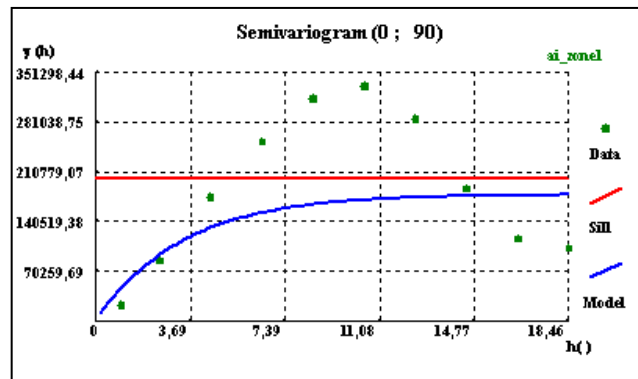
**Figura 1:** Representação gráfica de um variograma segundo um modelo esférico com um determinado patamar e valor de amplitude.

Relativamente ao modelo exponencial (Figura 2) e comparando com o modelo anterior, o exponencial apresenta um superior crescimento junto à origem e uma maior continuidade

espacial, a grandes distâncias  $h$ . Este modelo atinge o patamar assintoticamente e a amplitude é definida como a distância na qual o valor do modelo atinge 95% do patamar (Soares, 2006), ou seja:  $\gamma(a) = 0.95C$ . O modelo exponencial é expresso, assim, pela seguinte equação (Equação 11):

$$\gamma(h) = C \left[ 1 - e^{-3h/a} \right]$$

Equação 11

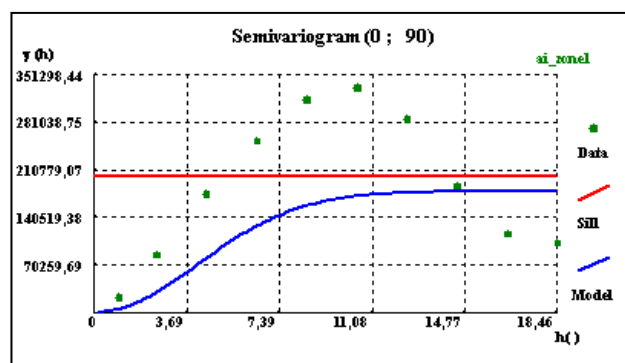


**Figura 2:** Representação gráfica de um variograma segundo um modelo exponencial com um determinado patamar e valor de amplitude.

O modelo Gaussiano (Figura 3) é caracterizado pelo seu comportamento parabólico nas vizinhanças da origem, apresentando um crescimento lento e favorável ao ajuste de fenômenos regulares, em contraste com o crescimento rápido dos dois modelos anteriores que denunciam um comportamento de fenômenos mais irregulares. O modelo Gaussiano reflete, assim, uma grande continuidade da variável em estudo, tendo como expressão geral (Equação 12):

$$\gamma(h) = C \left( 1 - e^{\left( \frac{-3h^2}{a^2} \right)} \right)$$

Equação 12



**Figura 3:** Representação gráfica de um variograma segundo um modelo Gaussiano com um determinado patamar e valor de amplitude.

O valor da amplitude corresponde à distância para a qual o modelo atinge 95% do patamar:  $\gamma(a) = 0.95C$ ; o mesmo acontece no modelo exponencial.

Tal como foi referido anteriormente, existem modelos que não tendem para um patamar quando  $h$  tende para infinito, que é o caso do modelo de potência, onde não existe uma variância finita devido às grandezas que crescem com a dimensão do campo de dispersão  $Z(x)$  (Soares, 2006). Este modelo pode ser traduzido pela seguinte expressão (Equação 13):

$$\gamma(h) = Ch^\alpha$$

**Equação 13**

Em que o expoente  $\alpha$  vai variar entre 0 e 2. Consoante a variação do expoente  $\alpha$ , a representação gráfica desta função pode ter diferentes comportamentos:

- linear, se  $\alpha = 1$ ;
- parabólico, se  $1 < \alpha < 2$ ;
- logarítmico, se  $0 < \alpha < 1$ .

A continuidade espacial de um dado recurso pode variar consoante as diferentes direções do espaço, como será melhor analisado na secção 2.1.4. Assim sendo, quando não existe essa variação de comportamento, ou seja, independentemente de qual seja a direção considerada, se a continuidade espacial do fenómeno se mantiver, então diz-se haver isotropia da variável, cujo variograma depende apenas do módulo do vetor  $h$ . No caso de existirem direções privilegiadas, isto é, da variável se estender preferencialmente numa direção particular diz-se haver anisotropia, que neste caso vai depender também da direção do vetor  $h$  (Soares, 2006).

A combinação de estruturas (modelos de variogramas), designadamente por estruturas imbricadas, é muito utilizada na modelização de variogramas, uma vez que nem sempre os fenómenos espaciais estudados apresentam estruturas de continuidade simples. Estas estruturas revelam a presença de variações do fenómeno em diferentes escalas com continuidades espaciais de características diferentes, não se cingindo à modelização de apenas uma estrutura, mas sim à justaposição de duas ou mais estruturas (funções) na mesma representação gráfica, ou seja, no mesmo variograma. Esta variabilidade do fenómeno torna por vezes impossível o ajuste do modelo teórico ao variograma, em que utilizando uma estrutura única, ter-se-ia de eventualmente ultrapassar o patamar, modelizando-se, assim, com duas estruturas, caracterizadas por duas amplitudes ( $a_1$  e

$a_2$ ) e dois patamares ( $C_1$  e  $C_2$ ) distintos. A soma dos diferentes patamares das duas estruturas designa-se por patamar global do variograma:  $C = C_1 + C_2$  (Soares, 2006).

A modelização de estruturas anisotrópicas permite reduzir as estruturas de continuidade das diferentes direções a um único modelo, transformando-as, deste modo, em estruturas isotrópicas. Podem ser, assim, identificados dois tipos de anisotropia, nomeadamente a anisotropia geométrica e a anisotropia zonal.

Em relação à anisotropia geométrica, esta caracteriza-se pelo facto de os variogramas apresentarem o mesmo modelo com amplitudes diferentes e sempre o mesmo patamar, em todas as direções, sendo o modelo de anisotropia mais comum. Verifica-se, também, a perpendicularidade das direções de máxima e mínima amplitudes, podendo haver distribuição segundo a forma de uma elipse (em 2D) ou de um elipsoide (3D). Ao contrário da anisotropia geométrica, a zonal ocorre quando os variogramas relativamente a direções diferentes são distintos, pois apresentam patamares diferentes, o que torna o processo de modelização mais complexo. Este tipo de anisotropia é comum em fenómenos estratificados, verificando-se uma menor variação da continuidade espacial ao longo do estrato (em qualquer direção horizontal) comparativamente com a variabilidade entre diferentes estratos (na direção vertical, em profundidade), não atingindo o patamar do variograma.

#### **2.1.4 Análise de Continuidade Espacial**

O estudo de continuidade espacial tem como objetivo o conhecimento da dispersão espacial dos dados experimentais bem como o grau de anisotropia entre as variáveis em questão, relativamente às características de um determinado fenómeno espacial.

Existem algumas regras de práticas multidisciplinares a ter em conta no estudo da análise da continuidade espacial, envolvendo o cálculo e modelização de variogramas. Estas regras podem ser compiladas e subdivididas nos seguintes grupos: Qualidade e Tipo de Amostragem, Conceptualização do Modelo Geoestatístico e Análise Estatística de Dados (Soares, 2006).

O primeiro grupo (Qualidade e Tipo de Amostragem) é importante visto que por vezes existem valores anómalos nos dados amostrados, provenientes de distribuições assimétricas muito acentuadas, podendo gerar valores anómalos do variograma, para alguns passos  $h$ . Assim, é necessário ter em conta os *clusters* de amostras (agrupamentos preferenciais) uma vez que estes tendem a enviesar, natural e significativamente, os estimadores dos variogramas, de médias, de histogramas, entre



outros (Soares, 2006). Em distribuições muito assimétricas, quando ocorrem valores anómalos no variograma, o mais simples, na prática, é a remoção dos *outliers*, ou seja, remoção dos pares de pontos anómalos do valor médio do variograma, referentes aos respectivos passos  $h$ . A variabilidade espacial de um determinado fenómeno é um fator muito importante e a ter em conta, uma vez que, se diferentes tipos de dados apresentarem diferentes estruturas (variabilidade espacial), independentemente de serem relativas ao mesmo recurso, se torna necessário tratar de cada variável separadamente, integrando depois conjuntamente o mesmo algoritmo (Soares, 2006).

Relativamente à Conceptualização do Modelo Geoestatístico, é importante definir a variável regionalizada  $Z(x)$ . Esta variável regionalizada consiste numa única realização de um conjunto de variáveis aleatórias referentes às características do fenómeno espacial em estudo, apresentando entre si (variáveis aleatórias) uma correlação espacial (Soares, 2006). Na conceptualização da variável regionalizada, é necessário ter em conta certas características que esta deve apresentar, nomeadamente o mesmo significado físico em todas as amostras, garantindo assim, esse significado no valor estimado. Outro fator a ter em conta diz respeito ao suporte em que é medida a grandeza, uma vez que a mistura de grandezas medidas em suportes diferentes não é uma prática aconselhável, pois apresentam variabilidades distintas. Finalmente, é necessário definir, também, o campo de extensão da variável regionalizada, devendo este campo ser considerado homogéneo relativamente às medidas da continuidade espacial (médias, variâncias ou variogramas) a estimar; nas situações em que o domínio seja considerado heterogéneo, deve-se dividir o mesmo (da melhor forma possível) em subdomínios homogéneos e consequentemente serem tratados e analisados separadamente (Soares, 2006).

Por último e não menos importante, é fundamental realizar a Análise Estatística dos Dados, ou seja, após a definição das bases do modelo é necessário, nesta etapa, avaliar estatisticamente as características da variável regionalizada, através da análise univariada e multivariada de dados. Esta análise estatística pode ser avaliada em três grupos descritivos da distribuição espacial, sendo eles: Descrição Univariada, Descrição Bivariada (quando possível) e Descrição Espacial (Soares, 2006).

A Descrição Univariada de uma amostra consiste na realização de análises individuais de variáveis de forma a ter uma ideia da dispersão do atributo em estudo, apresentando a característica ou tendência dos dados de uma variável. O seu estudo é baseado em tabelas de frequências, histogramas e histogramas cumulativos, obtendo-se assim, medidas de localização da distribuição (mínimo, máximo, média, mediana, quartis,

percentis), medidas de dispersão (amplitude, variância, desvio padrão) e medidas de forma (Soares, 2006).

A Descrição Bivariada consiste no estudo do comportamento simultâneo de duas variáveis, ou a mesma variável obtida em localizações distintas. Permite estabelecer relações entre as duas variáveis, possibilitando determinar se as diferenças, entre as distribuições das mesmas, são significativas a nível estatístico. Para uma análise bivariada utilizam-se essencialmente os *biplots*, os bi-histogramas e os diferentes instrumentos de análise de regressão (Soares, 2006). Na análise bivariada deste trabalho científico foi utilizado o tipo de representações gráficas denominado de *scatterplot*, sendo um tipo de gráfico mais amplamente utilizado na correlação de duas variáveis definidas nas mesmas posições espaciais.

Por último, a Descrição Espacial é uma etapa que tem como objetivo principal a visualização do comportamento da variável em estudo, relativamente à sua dispersão no espaço. Pretende-se também fazer o planeamento dos parâmetros base para o cálculo dos variogramas, através da visualização do arranjo espacial dos dados experimentais da variável, bem como obter uma primeira ideia das características de dispersão espacial da mesma variável, nomeadamente anisotropias e anomalias, entre outras (Soares, 2006). Dentro de algumas das características mais salientes das análises uni e bivariada que se pretendem visualizar nesta etapa, salienta-se a localização e dispersão espacial dos valores extremos de um histograma. O facto de os valores extremos serem altos ou baixos e a dependência da sua localização (se se encontram concentrados na mesma área ou não), faz variar os valores das médias e das variâncias locais; assim, para uma determinada área em estudo:

- quanto mais altos forem os valores extremos e se estiverem aglomerados na mesma área, maior será o valor da média e menor será o valor da variância local;
- quanto mais altos forem os valores extremos e não existir concentração (aglomeração) dos mesmos numa área, maior será o valor da média bem como o da variância local;
- quanto mais baixos forem os valores extremos nessa área, mais baixo será o valor da média, ao contrário da variância local que tende a aumentar.

São situações como as referidas acima que se têm de ter em conta, essencialmente, quando caracterizadas pelo aumento dos valores das variâncias locais, que normalmente

implicam a inferência espacial com maiores erros e, sobretudo, com maior incerteza (Soares, 2006).

## 2.2 Inferência de Processos Naturais

### 2.2.1 Estimação e Simulação

Na modelação geoestatística existem duas aproximações (metodologias) principais diferentes que permitem a inferência de um determinado valor,  $Z(\mathbf{u})^*$ , para uma propriedade de interesse numa determinada localização  $\mathbf{u}$ , através de um conjunto de dados experimentais,  $Z(\mathbf{u}_\alpha), \alpha=1 \dots N$ , com  $N$  equivalente a todas as localizações possíveis ao longo da malha de interpolação. Estas duas metodologias consistem nas técnicas de krigagem, inseridas nos processos de estimação, e nas de simulação sequencial, que como o próprio nome denomina, aborda os processos de simulação (Goovaerts, 1997; Azevedo, 2013). Nos processos de estimação, as técnicas de krigagem (Matheron, 1965), permitem a estimação das propriedades do modelo através da interpolação dos valores dos dados experimentais  $Z(\mathbf{u}_\alpha)$ , que normalmente consistem nos dados dos poços na modelação de reservatórios. Esta interpolação deve-se à utilização dos algoritmos matemáticos que se fundamentam na regressão dos valores experimentais, através da minimização dos erros de interpolação pela regressão dos mínimos quadrados parciais (Goovaerts, 1997). Existem vários interpoladores baseados nos processos de Krigagem, tais como a Krigagem Simples e Ordinária, entre outros, onde todos eles se fundamentam na seguinte equação (Equação 14) (Azevedo, 2013):

$$Z(\mathbf{u})^* - m(\mathbf{u}) = \sum_{\alpha=1}^{n(\mathbf{u})} \lambda_{\alpha}(\mathbf{u}) [Z(\mathbf{u}_{\alpha}) - m(\mathbf{u}_{\alpha})]$$

**Equação 14**

Com  $\lambda_{\alpha}(\mathbf{u})$  definido como os pesos de uma variável aleatória específica  $Z(\mathbf{u}_{\alpha})$ ;  $m(\mathbf{u})$  e  $m(\mathbf{u}_{\alpha})$  são os valores espectáveis para  $Z(\mathbf{u})^*$ , e  $Z(\mathbf{u}_{\alpha})$ , respetivamente;  $n(\mathbf{u})$  define o número máximo de pontos de dados que constituem o conjunto de dados condicionantes, dentro de uma vizinhança à localização  $\mathbf{u}$ .

O principal objetivo dos modelos de estimação é a obtenção da imagem mais provável das características de uma dada propriedade (Soares, 2006). No entanto, estes métodos (técnicas de Krigagem) não permitem aceder ao comportamento extremo do conjunto de pontos de uma determinada região em estudo. Ou seja, os valores extremos (altos e baixos) esperados da propriedade de interesse não são reproduzidos (Deutsch & Journel 1998; Doyen 2007; Soares 2006) tratando-se assim, de uma forma de representação

mais atenuada da geologia de subsuperfície, sem a variabilidade espacial do conjunto das amostras. Este tipo de representações mais atenuadas não são suficientes para aceder aos efeitos de cenários extremos (como por exemplo valores extremamente altos ou baixos de permeabilidade na simulação de fluidos), contudo na caracterização de reservatórios (cálculos de reservas e simulação de fluidos) é muito importante a obtenção de modelos credíveis e de alto detalhe, da subsuperfície da Terra, para a uma boa tomada de decisões. Os modelos devem ser geologicamente realísticos, permitindo a reprodução dos valores extremos presentes nos dados experimentais e incorporando as variabilidades a pequena escala (Azevedo, 2013).

Assim, os modelos de estimação, normalmente, são utilizados para o estudo de grandezas ou recursos com características homogêneas, uma vez que apresentam baixa variabilidade (como o caso do topo ou base de camadas estratigráficas), ao contrário dos modelos de simulação que devido à sua elevada variabilidade, são considerados mais eficazes quando se tratam de variáveis com características mais heterogêneas (como o caso da porosidade, entre outras propriedades).

Através da representação da Figura 4, verifica-se que, ao contrário dos modelos de estimação que fornecem a imagem mais provável das características de um recurso, os modelos de simulação fornecem um conjunto de imagens equiprováveis com a mesma variabilidade espacial dos valores experimentais (Soares, 2006)

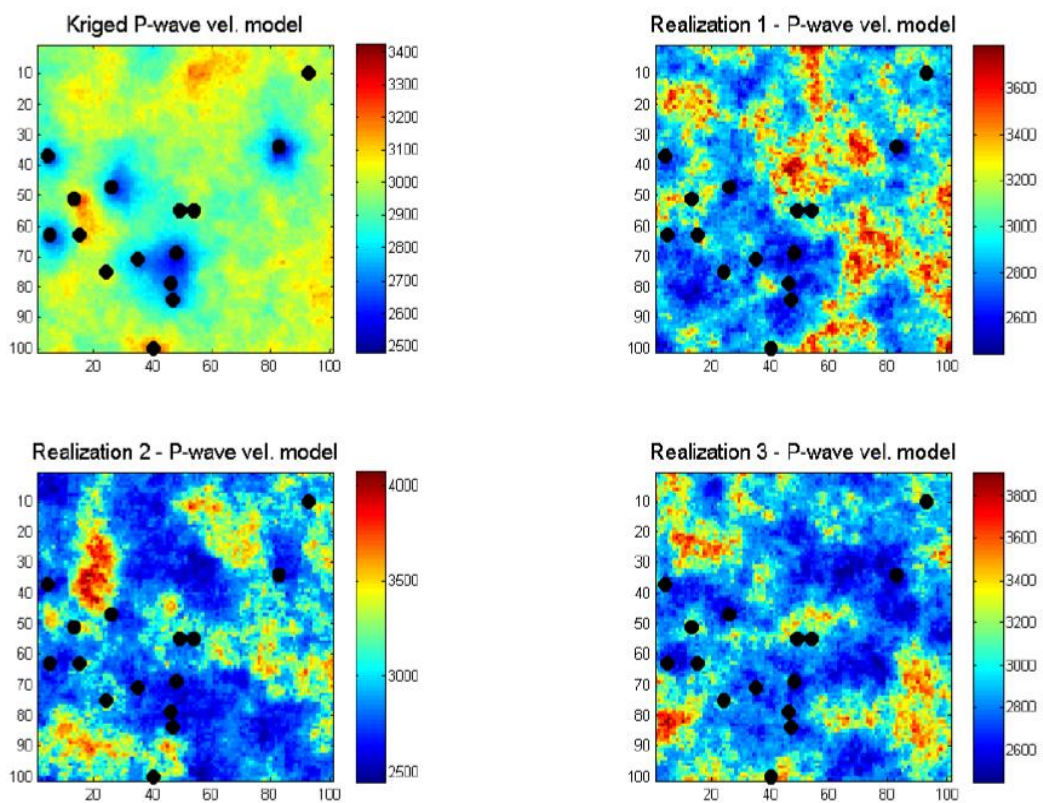
Como referido anteriormente, o comportamento extremo simultâneo do conjunto de dados, são apenas acessíveis através de várias realizações da distribuição conjunta dos valores da propriedade (Soares, 2006). Devido a estas limitações dos processos de estimação (relacionadas com as metodologias de Krigagem), introduziram-se os algoritmos de simulações sequenciais, como ferramenta essencial de modelação (Deutsch & Journel, 1998).

Este novo conjunto de técnicas de simulação geoestatística permite a interpolação da propriedade de interesse, reproduzindo os valores extremos, a partir dos dados experimentais, exibindo, também, variabilidade a pequena escala. A utilização dos algoritmos de simulação sequencial estocástica, através da interpretação do conjunto de realizações, permite o acesso à quantificação da incerteza espacial relativa à propriedade em estudo (Goovaerts 1997; Doyen 2007). Permite, também, a visualização do comportamento extremo simultâneo das suas características morfológicas da propriedade, o que não acontece nos modelos de estimação.

Quando comparados com os modelos resultantes dos processos de Krigagem (estimação), os modelos de simulação estocástica são variáveis e heterogêneos permitindo uma melhor avaliação do risco e, conseqüentemente, uma melhor tomada de decisões (Azevedo, 2013).

Todos os modelos simulados dos vários conjuntos de realizações partilham e reproduzem as mesmas características:

- localização espacial dos valores dos dados experimentais;
- elementos estatísticos como a média e variância;
- continuidade e variabilidade espacial padrão, representada (por exemplo) pelos modelos de variograma.

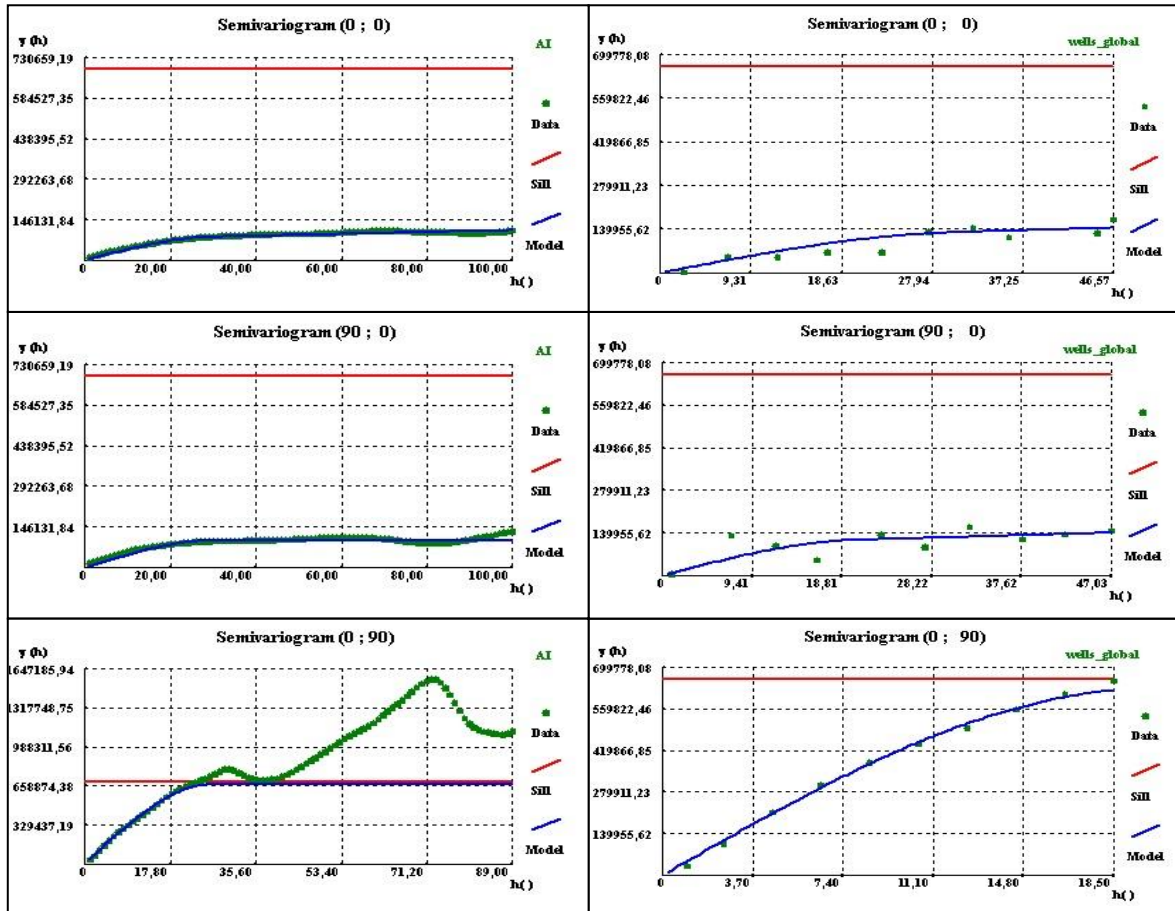


**Figura 4:** Comparação entre um modelo resultante de um processo de estimação por Krigagem (canto superior esquerdo) com três diferentes realizações, para velocidades das ondas P. Os dados experimentais utilizados no processo de modelação foram os mesmos para os quatro modelos, estando localizados e representados pelos círculos preenchidos pretos. A variabilidade dos modelos simulados é muito maior quando comparada com os modelos interpolados pelo processo de Krigagem (retirado de Azevedo, 2013).

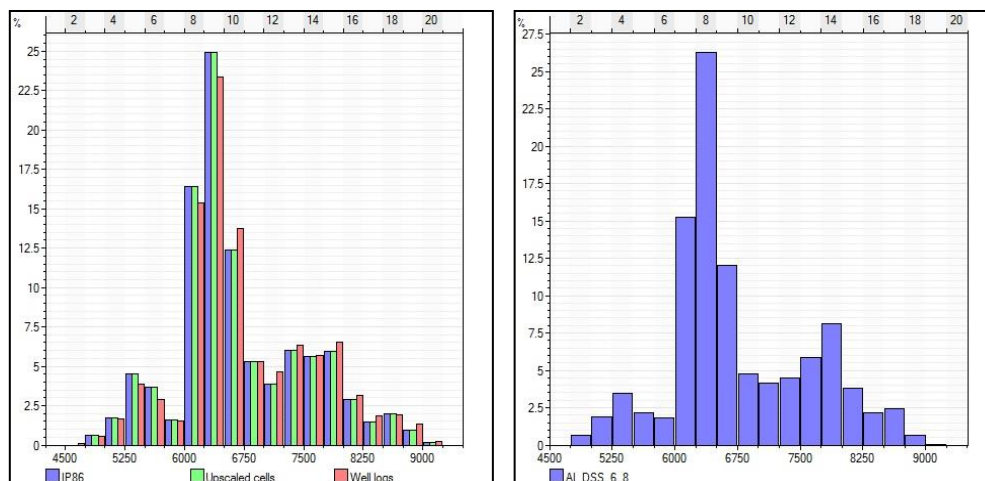
### 2.2.2 Simulação Sequencial Estocástica

A simulação sequencial estocástica consiste num método de geração de  $n$  realizações equiprováveis da propriedade em estudo (como impedâncias acústica e elástica), recorrendo aos dados experimentais (informação directa) e aos dados de reflexão sísmica (informação indirecta) entre localizações de poços, tendo como principal objetivo a quantificação da incerteza dessas propriedades (Azevedo *et al.*, 2012).

A nível geoestatístico, um modelo de simulação de um fenómeno espacial pretende e permite a geração de imagens das características do recurso em estudo, nas quais são reproduzidas a proporção e a maior ou menor continuidade espacial dos diferentes corpos, das heterogeneidades e das classes extremas dos histogramas dessas características (Soares, 2006). Para uma simulação geoestatística ser válida é necessário: reproduzir o histograma (e os estatísticos) dos dados condicionantes (Figura 6), assegurar a função da continuidade espacial representada pelos variogramas (Figura 5) e a localização dos dados condicionantes dos *logs* dos poços (Figura 7). A integração dos dados de *logs* dos poços, no mesmo procedimento de inversão, permite que as metodologias inversas estocásticas assegurem e reproduzam a localização dos valores dos dados reais de *logs* dos poços, ao contrário das metodologias inversas determinísticas (Doyen 2007 & Filippova, Kozhenkov, e Alabushin 2011; *in* Azevedo, 2013).

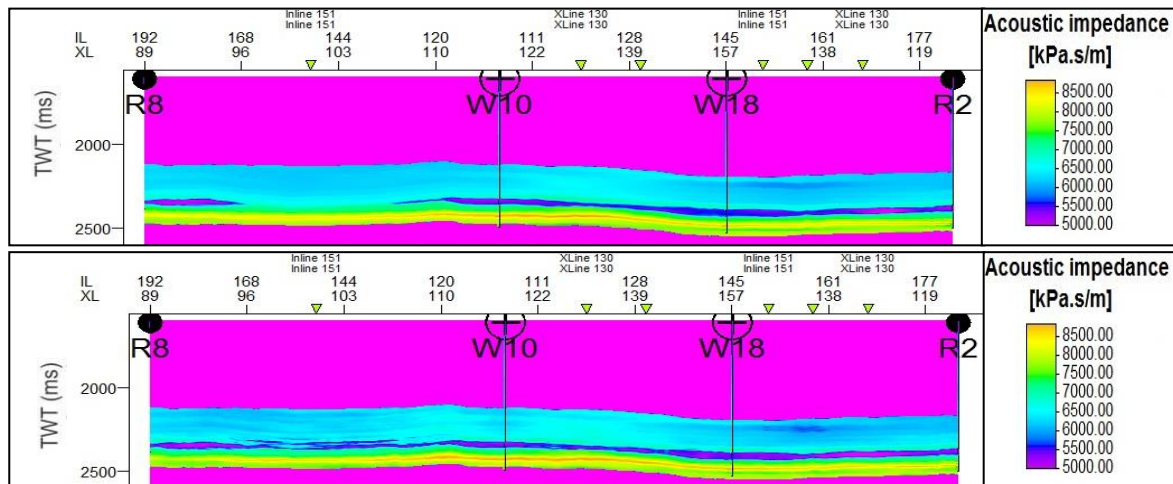


**Figura 5:** Modelos de variogramas com as direções N-S (0;0), E-W (90;0) e vertical (0;90), referentes a um modelo de impedância acústica simulado (à esquerda). Os dados dos logs dos poços, que condicionaram o modelo referido, estão representados pelos modelos de variogramas com as direções N-S, E-W e vertical (à direita).



**Figura 6:** Representação dos histogramas (função de distribuição de probabilidades) estimados a partir dos dados de log dos poços (à esquerda) e do modelo de impedância acústica simulado (à direita) referido na Figura 5.





**Figura 7:** Seções verticais extraídas do modelo original (dos dados de *logs* dos poços) de impedância acústica (topo) e do modelo de impedância acústica simulado (base) referido na Figura 5. A seção vertical do modelo de IA simulado honra e reproduz os dados de *logs* dos poços e a sua localização.

### 2.2.3 Incerteza local e incerteza Espacial

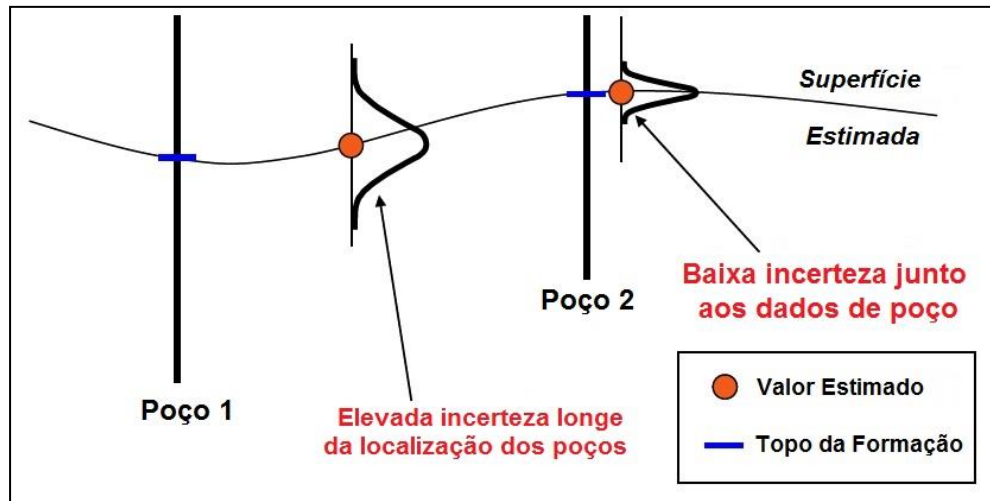
Existem dois tipos de conceito de incerteza: local e espacial. A incerteza local pode ser definida como a probabilidade (individual) de o valor de um dado ponto  $x_0$  exceder ou ser menor do que um dado valor de corte, contemplando, assim, um ponto ou uma área específica (Soares, 2006).

Contudo, a geoestatística centra-se essencialmente na incerteza espacial definindo-se na probabilidade de um conjunto de pontos exceder, simultaneamente, um dado valor limite ou de corte (probabilidade conjunta). Resulta, assim, do comportamento simultâneo relativo a um conjunto de variáveis, utilizando-se modelos geoestatísticos de simulação sequencial de modo a simular um conjunto de imagens do fenómeno em estudo. Estas imagens designam-se por imagens equiprováveis apresentando igualdade na representação do fenómeno, preservando e reproduzindo os estatísticos de variabilidade espacial das amostras, como os histogramas e variogramas (Soares, 2006).

A incerteza espacial surge devido à falta de informação ou conhecimento sobre os processos físicos para modelar relativamente à extensão da área em estudo, uma vez que a incerteza, ao longo desta área não tem uma distribuição homogénea (Azevedo, 2013). Este facto deve-se à dependência da distribuição espacial dos poços e à quantidade dos mesmos, obtendo-se valores mais elevados de incerteza em zonas



localizadas mais distantes dos poços (Figura 8), onde os dados disponíveis são menores (Caers, 2011).



**Figura 8:** Representação esquemática realçando a estimação de valores, em localizações sem informação, numa determinada superfície. Nas áreas longe dos poços, existe uma maior incerteza espacial associada ao valor estimado, em comparação com localizações perto dos poços, onde a incerteza espacial associada é muito menor (adaptado de Francis, 2006).

Apesar da sísmica abranger toda a área em estudo é um método indireto da geologia da subsuperfície, sendo menos fidedigno, e não permite a obtenção nem de amostras nem valores de propriedades petro-físicas (como porosidade ou permeabilidade), dependendo sempre também da qualidade dos dados sísmicos. No entanto, os poços não apresentam dados suficientes relativamente à cobertura espacial da área em estudo, o que faz aumentar a incerteza nas áreas longe dos poços. Tanto os dados de reflexão sísmica como os dados de poços apresentam diferentes graus de incerteza, contudo integram-se estes dois tipos de informação, através das suas características, com o objetivo de reduzir a incerteza espacial nas zonas distantes das áreas de poços, do modelo de reservatório (Caetano, 2012).

O acesso à incerteza torna-se, assim, um processo com uma elevada complexidade mas muito importante permitindo uma melhor gestão e decisões no sentido de diminuir os custos e o nível de risco na exploração da área em estudo (Doyen 2007; Caers 2011).

#### 2.2.4 Modelos de Simulação Geoestatística

A simulação sequencial geoestatística é uma das técnicas geoestatísticas mais utilizadas, que permite a interpolação de uma propriedade ou recurso de interesse, tendo como

principal objetivo a reprodução de imagens representativas da continuidade espacial desse mesmo fenómeno, através de um variograma, bem como a proporção das heterogeneidades e das classes extremas dos histogramas dessas características (Soares, 2006).

Estes modelos de simulação geoestatística devem ser realísticos do ponto de vista geológico, incorporando uma variabilidade a pequena escala e permitindo a reprodução dos valores mais extremos bem como os mínimos e os máximos, relativamente aos valores experimentais (Azevedo, 2013). A utilização de modelos geoestatísticos, baseados nos algoritmos de simulação estocástica, são uma boa e credível opção, na solução de problemas ambientais e das Ciências da Terra, se o propósito for aceder à distribuição espacial de um determinado atributo e à incerteza espacial (Horta & Soares, 2010).

Considerando  $Z_c(x)$  o conjunto de valores simulados e  $Z(x)$ , com  $x_\alpha = 1, \dots, n$ , os  $n$  valores experimentais, uma simulação geoestatística (imagem simulada) é considerada válida se respeitar as seguintes condições (Soares, 2006; Azevedo, 2013):

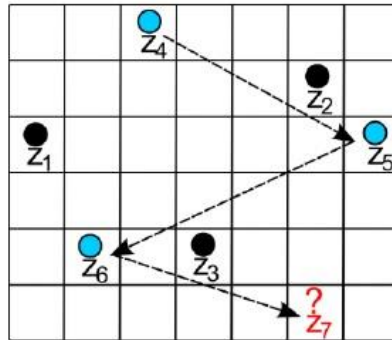
- a) Reprodução do histograma dos dados experimentais, em que para qualquer valor  $z$ :  $prob\{Z_c(x) < z\} = prob\{Z(x_\alpha) < z\}$ ;
- b) Condicionamento aos valores experimentais: para um ponto experimental  $x_\alpha$  qualquer, o valor simulado  $Z_c(x_\alpha)$  e o valor  $Z(x_\alpha)$ , vão coincidir, ou seja,  $Z(x_\alpha) = Z_c(x_\alpha)$ , apresentando a mesma variabilidade e a imagem simulada passa pelos pontos experimentais.
- c) Preservação da função de correlação espacial, como o variograma, ou seja, os variogramas dos valores experimentais,  $\gamma(h)$ , e dos valores simulados,  $\gamma_c(h)$ , vão ser iguais:  $\gamma_c(h) = \gamma(h)$ , em que a imagem simulada apresenta a mesma variabilidade, passando pelos pontos experimentais.

Há muitas superfícies (ou volumes de impedâncias, em 3D) que podem ir ao encontro dos critérios referidos acima, uma vez que o resultado para cada realização é diferente. É assim necessária a reprodução e análise de várias imagens de superfícies ou volumes, de forma a se poder explorar a incerteza associada e simular os volumes corretamente.

Cada modelo gerado pela simulação estocástica designa-se por realização. Dos vários modelos de simulação geoestatística (estocástica) de fenómenos espaciais que existem, a Simulação Sequencial é uma das grandes e mais recentes famílias de algoritmos de

simulação de imagens equiprováveis (Journel A. G. & Alabert F., 1988; Christakos G., 1992; Ripley B., 1987; Law A. & Kelton D., 1991; in Soares, 2006).

O princípio básico da simulação sequencial é simples e, resumidamente, (representado na Figura 9), baseia-se na simulação de um conjunto de variáveis aleatórias, através da aplicação do Teorema de Bayes em passos sequenciais sucessivos (Soares, 2006). De seguida, o procedimento deste princípio é apresentado mais detalhadamente.

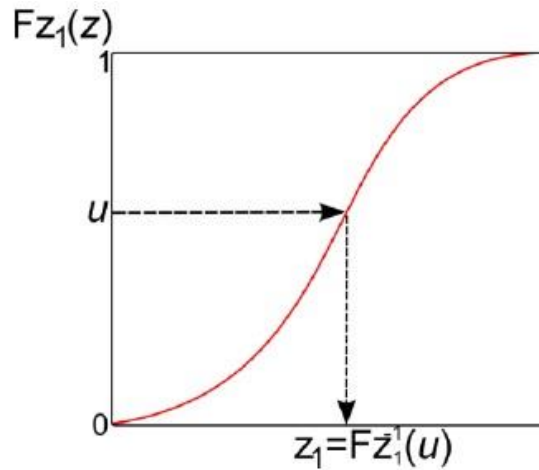


**Figura 9:** Representação esquemática do princípio da simulação sequencial, numa grelha 2D. Os círculos pretos preenchidos representam os dados experimentais disponíveis. Os círculos azuis preenchidos correspondem às células previamente simuladas da grelha, ao longo de um caminho aleatório representado pelas setas a tracejado. O valor da célula  $z_7$  corresponde à localização da grelha onde a simulação está a ser realizada (adaptado de Azevedo, 2013).

Existem vários métodos para gerar valores de uma variável aleatória  $Z_1$  através da sua função de distribuição cumulativa (fdc),  $F_{Z_1}(z)$ , aplicando-se, normalmente, a metodologia de transformada inversa (Figura 10), uma vez que é dos métodos mais simples. Considerando uma outra variável  $U$ , com uma distribuição uniforme compreendida entre  $[0,1]$ , um valor de  $z$  da variável  $Z_1$  é então simulado:  $z = F^{-1}(u)$ , a partir da geração aleatória de um valor de  $u$  e do cálculo da transformada inversa, sendo  $F^{-1}$  a função inversa da fdc local  $F_{Z_1}(z)$  (Azevedo, 2013; Soares, 2006).

Referido anteriormente como o princípio da Simulação Sequencial, o princípio de Bayes,  $F(Z_1, Z_2) = F(Z_2 | Z_1) F(Z_1)$  referente à obtenção do par de valores  $z_1$  e  $z_2$  das variáveis  $Z_1$  e  $Z_2$ , pode generalizar-se para um conjunto de  $N$  variáveis aleatórias  $(Z_1, \dots, Z_N)$  (Equação 15) (Soares, 2006):

$$F(Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_N) = F(Z_1) F(Z_2 | Z_1) F(Z_3 | Z_1, Z_2) \dots F(Z_N | Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_{N-1}) \quad \text{Equação 15}$$



**Figura 10:** Geração de um valor ( $z_1$ ), a partir de uma variável ( $F_{z_1}$ ) utilizando a metodologia da transformada inversa: definição de um valor aleatório  $u$  a partir de uma distribuição uniforme no intervalo  $[0,1]$ ; cálculo do valor simulado correspondente,  $z_1$ , através de  $z_1 = F_{z_1}^{-1}(u)$  (adaptado de Azevedo, 2013).

O conjunto de valores  $(Z_1, \dots, Z_N)$ , com uma distribuição conjunta  $F(Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_N)$ , através de  $N$  variáveis aleatórias e de  $n$  dados experimentais condicionantes iniciais, vão gerar uma função conjunta de distribuição condicional:  $F(N) = (Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_N | n)$ . Esta função conjunta é obtida, sequencialmente, percorrendo toda a grelha de simulação e recorrendo, para além dos dados experimentais, aos valores simulados do passo anterior, respetivamente, da mesma simulação (Azevedo, 2013).

A inclusão dos valores simulados anteriores, referentes a cada passo da simulação sequencial, garante a dependência e correlação espacial entre as  $N$  variáveis aleatórias (Azevedo, 2013). Nos algoritmos de simulação sequencial, o ponto fulcral consiste precisamente no conhecimento das  $N$  fdc condicionais (Equação 16):

$$\begin{aligned} & \text{prob}\{Z(x_1) < z | (n)\} \\ & \text{prob}\{Z(x_2) < z | (n+1)\} \\ & \text{prob}\{Z(x_3) < z | (n+2)\} \\ & \vdots \\ & \text{prob}\{Z(x_N) < z | (n+N-1)\} \end{aligned}$$

**Equação 16**

Para a obtenção de um conjunto de valores  $(Z_1, \dots, Z_N)$  de  $F(N)$ , o processo de simulação sequencial é resumido no seguinte procedimento (Azevedo, 2013 ; Soares, 2006):

- a) No primeiro passo da simulação sequencial, ao longo do caminho aleatório pré-definido, é simulado um valor de  $z_1$  a partir da fdc  $F(Z_1|(n))$ , cujo valor ( $z_1$ ) vai ser considerado como um dado condicionante para os seguintes passos de simulação.
- b) Uma vez simulado um valor de  $z_1$ , o segundo passo consiste na simulação de um novo valor  $z_2$  através da distribuição condicional  $F(Z_2|(n+1))$  com base nos  $\{n+1\}$  valores condicionantes.
- c) Os  $n$  dados condicionantes originais são atualizados a cada passo da simulação, com o valor simulado resultante do passo da simulação anterior. Este processo sequencial repete-se para a simulação do conjunto de  $N$  variáveis aleatórias.

Alguns algoritmos geoestatísticos podem ser utilizados para a estimação das distribuições condicionais, acima referidas, sendo eles: Simulação Sequencial Gaussiana (SSG), Simulação Sequencial da Indicatriz (SSI) e Simulação Sequencial Directa (SSD). Dos três algoritmos indicados, apenas o último (SSD) foi utilizado no âmbito desta tese, ficando os outros dois algoritmos (SSI e SSG) fora dos objetivos deste trabalho científico.

### **2.2.5 Simulação e co-simulação Sequencial Directa (SSD e co-SSD)**

A simulação sequencial directa (SSD) é um método de simulação que utiliza a variável original não carecendo de qualquer transformação. Esta nova aproximação (SSD) é baseada no princípio introduzido por Journel (1994) para a simulação sequencial gaussiana. No entanto, foi com a otimização de Soares (2001) que este algoritmo permitiu, com sucesso, a reprodução do variograma e do histograma de uma variável contínua (Soares, 2001), através da utilização das médias e variâncias locais estimadas por krigagem simples para a re-amostragem da lei de distribuição e não para definir as leis de distribuição locais (à semelhança do método da SSG). Mas a vantagem essencial deste algoritmo proposto é a permissão dos procedimentos de simulação e co-simulação, sem a necessidade de recorrer a qualquer transformação das variáveis originais (Soares, 2001), tornando-se assim mais vantajoso em relação a outros métodos, como o caso dos métodos de simulação sequencial da indicatriz (SSI) e de simulação sequencial gaussiana (SSG) que necessitam dessa transformação (Soares, 2006).

Na prática, ocorre uma re-amostragem da função de distribuição cumulativa (fdc) global,  $F_z(z)$ , de forma a obter uma nova função de distribuição de probabilidades auxiliar,  $F'_z(z)$ , definida com intervalos centrados na estimação por krigagem simples,  $z(x_u)^*$ , e com uma amplitude proporcional à variância de krigagem,  $\sigma_{sk}^2$  (Soares, 2001; Azevedo, 2013). Esta nova função,  $F'_z(z)$ , pode ser construída pela definição de uma fdc Gaussiana local,  $G(y(x_u)^*, \sigma_{sk}^2(x_u))$ , gerada pela transformada Gaussiana (Equação 17) no intervalo de  $F_z(z)$ , centrada em  $z(x_u)^*$  (Equação 18) com uma amplitude proporcional de  $\sigma_{sk}^2$  (Equação 19) (Azevedo, 2013).

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z(x_i) = [z(x_u)]^*$$

**Equação 17**

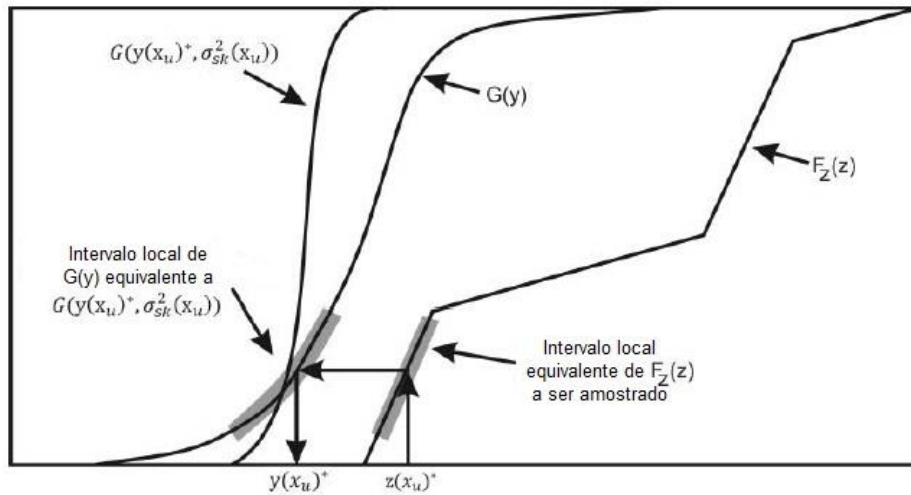
$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [z(x_i) - [z(x_u)]^*]^2 = \sigma_{sk}^2(x_u)$$

**Equação 18**

$$y(x) = \varphi(z(x)), \text{ com } G(y(x)) = F_z(z(x))$$

**Equação 19**

A Figura 11 apresenta o procedimento de simulação de um determinado  $z^s(x_u)$ , através do algoritmo SSD. Primeiro, o intervalo da função de distribuição de probabilidades global (original), definido pelas equações dos parâmetros (Equação 17) e (Equação 18), é transformado num domínio Gaussiano,  $G(y(x_u)^*, \sigma_{sk}^2(x_u))$ . Seguidamente, um determinado valor,  $y^2$ , é gerado, através do intervalo definido em  $G(y(x_u)^*, \sigma_{sk}^2(x_u))$ , pelo método de *Monte Carlo*. Por último, o valor simulado,  $z^s(x_u)$ , é obtido pela transformada inversa:  $z^s(x_u) = \varphi^{-1}(y^s)$  (Azevedo, 2013). É importante realçar que esta transformada Gaussiana é simplesmente utilizada na re-amostragem dos intervalos da lei de distribuição global,  $F_z(z)$ , não sendo necessário assumir uma Gaussiana para  $F_z(z)$ , como na SSG (Soares, 2001; in Azevedo, 2013).



**Figura 11:** Representação gráfica da re-amostragem da função de distribuição de probabilidades  $F_z(z)$  por intervalos definidos pela média local e variância de  $z(x_u)$ . O valor  $y(x_u)^*$  corresponde ao estimador local  $z(x_u)^*$ . O valor simulado  $z(x_u)^*$  é calculado a partir do intervalo de  $F_z(z)$  definido por  $G(y(x_u)^*, \sigma_{sk}^2(x_u))$  (adaptado de Soares, 2001).

A utilização de uma metodologia do tipo *Monte Carlo* faz com que a geração de cada valor simulado num ponto seja pseudo-aleatória, assim como, a sequência de simulação dos nós. Isto garante que haja independência entre as diferentes realizações do algoritmo. Todas as imagens geradas pela simulação sequencial são equiprováveis, respeitam o histograma condicionante e os dados originais, tornando-as imagens simuladas válidas (Nunes, 2008).

Assim, o algoritmo de simulação SSD pode ser descrito e resumido pela seguinte sequência de passos (Soares, 2001; Azevedo, 2013):

- 1) Definição de um caminho aleatório que cubra toda a grelha de simulação e passe por todos os nós,  $x_u$ , com  $u = 1, \dots, N_s$ , onde  $N$  é o número total de nós que constituem a grelha de simulação;
- 2) Estimação dos parâmetros da média local,  $z(x_u)^*$ , e da variância,  $\sigma_{sk}^2(x_u)$ , valores estimados por krigagem simples e condicionados pelos dados experimentais originais e pelos dados simulados previamente;
- 3) Definição do intervalo de  $F_z(z)$  a ser amostrado, através da fdc Gaussiana, como explicado anteriormente e ilustrado na Figura 11;
- 4) Geração de um valor  $z^s(x_u)$  a partir da fdc de  $F_z(z)$ :
  - a. Geração de um valor  $p$  de uma distribuição uniforme  $U(0,1)$ ;

- b. Geração de um valor  $y^2$  de  $G(y(x_u)^*, \sigma_{sk}^2(x_u))$ :  $G^{-1}(y(x_u)^*, \sigma_{sk}^2(x_u), p)$ ;
  - c. Cálculo de um valor simulado  $z^s(x_u) = \varphi^{-1}(y^s)$ ;
- 5) Repetição dos passos anteriores até todos os  $N_s$  nós, da grelha de simulação, terem sido simulados.

É importante realçar que para a obtenção de modelos de simulação fiáveis é necessário garantir alguns elementos estatísticos originais (como a média e as variâncias locais) estimados a partir dos dados experimentais, bem como a reprodução dos variogramas (covariância espacial) e do histograma da variável contínua original (Azevedo, 2013; Soares, 2006).

Após a simulação de uma determinada variável (ou propriedade), a SSD pode ser aplicada à simulação de variáveis secundárias que, em vez de simular simultaneamente  $N_v$  variáveis, cada variável é simulada por sua vez, sempre condicionada à variável simulada anteriormente (Gomez-Hernandez & Journel, 1994; Goovaerts, 1997; *in* Soares, 2001), isto é, existe uma relação adjacente entre a propriedade já simulada e a nova propriedade a simular. Este processo é denominado de co-simulação, onde a propriedade que é simulada em primeiro lugar é designada de variável secundária e a propriedade a simular é, por sua vez, a variável primária (Azevedo, 2013). Por vezes, a variável secundária é escolhida devido à sua importância ou devido à sua elevada continuidade espacial, comparativamente com a variável primária (Goovaerts, 1997).

O princípio de *Bayes* pode ser aplicado no procedimento de co-simulação de forma a poder calcular-se a distribuição de probabilidades condicional local, numa determinada localização  $\mathbf{u}$ . Supondo o caso de duas variáveis dependentes em questão: a variável secundária  $Z_1(x)$ , simulada previamente por qualquer processo de simulação estocástica (por exemplo, SSD) e a variável primária  $Z_2(x)$ , correspondente à nova propriedade a simular e condicionada ao modelo previamente simulado de  $Z_1(x)$ . Os valores simulados de  $Z_2(x)$  podem ser gerados pela distribuição de probabilidades condicional, na localização desconhecida  $\mathbf{u}$ , através da seguinte expressão (Equação 20) (Soares, 2001):

$$F_z(Z_2(x_u)|Z_2(\alpha), Z_1 = z_1^s(x_u), u = 1, \dots, N) \quad \text{Equação 20}$$



Onde  $z_1^s(x_u)$  são os valores previamente simulados para  $Z_1(x)$  e  $z_2(\alpha)$  são os dados experimentais para a variável primária e para os valores previamente simulados de  $Z_2(x)$ , dentro de uma vizinhança adjacente à localização de  $\mathbf{u}$ .

Na co-simulação sequencial directa (co-SSD), é necessário estimar a co-krigagem local  $[Z_2(x_u)^*]_{CSK}$  (Equação 21) e a respetiva variância de co-krigagem  $\sigma_{CSK}^2(x_u)$  (Equação 22), referentes à propriedade a ser simulada, de forma a amostrar distribuição de probabilidades global de  $F_{z_2}(z)$ . Estes parâmetros podem ser calculados através da estimação de co-krigagem simples co-localizada (Soares, 2001 ; *in* Azevedo, 2013):

$$[Z_2(x_u)^*]_{CSK} = \sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} [z_2(x_{\alpha}) - m_2] + \lambda_{\beta} [z_1(x_u)^* - m_1] + m_2$$

**Equação 21**

$$\sigma_{CSK}^2(x_u) = var\{Z_2(x_u)^* - Z_2(x_u)\}$$

**Equação 22**

O procedimento da co-SSD pode ser descrito, analogamente ao da SSD, através da seguinte sequência de passos (Soares, 2001; Azevedo, 2013):

- 1) Simulação da variável secundária  $Z_1(x)$ , para toda a grelha de simulação, através da SSD ou outro método de simulação sequencial;
- 2) Definição de um caminho aleatório que cubra toda a grelha de simulação e passe por todos os nós,  $x_u$ , com  $u = 1, \dots, N_s$ , onde  $N$  é o número total de nós que constituem a grelha de simulação;
- 3) Estimação dos parâmetros da média local e da variância em,  $x_u$ , com a estimação da co-krigagem simples co-localizada (Equação 21) e correspondente variância de co-krigagem (Equação 22), condicionados pelos dados experimentais originais  $z_2(\alpha)$ , pelos dados simulados previamente  $z_2(x_{\alpha})^*$  e pelo valor da variável secundária  $z_1(x_u)^*$ , dentro de uma vizinhança adjacente a  $\mathbf{u}$ ;
- 4) Definição do intervalo de  $F_{z_2}(z)$  a ser amostrado, como explicado anteriormente e ilustrado na Figura 11;
- 5) Cálculo de um valor  $z_2(x_u)^*$ , a partir da fdc de  $F_{z_2}(z)$ :
  - a. Geração de um valor  $p$  de uma distribuição uniforme  $U(0,1)$ ;
  - b. Geração de um valor  $y^2$  de  $G(y_2(x_u)^*, \sigma_{sk}^2(x_u))$  :  
 $y^S = G^{-1}(y_2(x_u)^*, \sigma_{sk}^2(x_u), p)$ ;
  - c. Cálculo de um valor simulado  $z_2^s(x_u) = \varphi_2^{-1}(y^S)$  da variável secundária;

- 6) Repetição dos passos anteriores até todos os  $N_s$  nós, da grelha de simulação, terem sido simulados.

Os modelos co-simulados resultantes permitem reproduzir os valores dos dados experimentais ( $z_2(x_\alpha)$ ) nas suas localizações, a distribuição de probabilidades marginal de  $F_{z_2}(z)$  e a continuidade espacial padrão imposta por um modelo de variograma. Esta metodologia pode abranger a simulação conjunta de  $N_v$  variáveis que, por certo, é a principal vantagem deste método proposto (Soares, 2001). No entanto, os modelos simulados resultantes da co-SSD permitem apenas a reprodução de correlações lineares entre as variáveis primária e secundária ( $F_z(Z_2|Z_1)$ ), independentemente da distribuição de probabilidades conjunta observada nos dados experimentais (Horta & Soares, 2010).

Esta questão revela-se como uma evidente limitação na metodologia de co-simulação descrita, uma vez que uma correlação linear entre propriedades simuladas não é muito adequado para uma modelação fiável de modelos petro-elásticos de subsuperfície (Avseth, Mukerji & Mavko, 2005; *in* Azevedo, 2013). Assim, na caracterização sísmica de reservatórios é muito importante a reprodução das relações não-lineares entre as propriedades de interesse, através das distribuições de probabilidade conjuntas estimadas a partir dos dados de poço. Estas correlações não-lineares abrangem as relações entre propriedades como densidade, velocidades das ondas-P e ondas-S ou mesmo entre impedâncias acústica e elástica (Azevedo, 2013).

### **2.2.6 Co-simulação Sequencial Directa com distribuições de probabilidade conjunta**

A prática da simulação estocástica com diversas aplicações no âmbito das ciências da Terra e do ambiente gerou novos problemas teóricos que motivaram, consequentemente, à otimização de algoritmos existentes. Devido às limitações referidas anteriormente, relativamente à metodologia co-SSD tradicional, foi desenvolvida e implementada uma nova versão do algoritmo de co-SSD. Esta nova aproximação, introduzida por Horta & Soares (2010) e, intitulada de co-simulação sequencial directa com distribuições de probabilidade conjunta, surgiu de forma a dissipar a questão das discrepâncias entre as distribuições conjuntas resultantes da co-simulação e os dados experimentais.

Ao contrário da co-SSD tradicional, este novo algoritmo permite a reprodução da distribuição conjunta experimental entre as variáveis primária e secundária, nos modelos simulados (Horta & Soares, 2010).

Como qualquer algoritmo de simulação sequencial estocástica, o procedimento da co-SSD com distribuições de probabilidade conjunta baseia-se na aplicação do princípio de Bayes, numa sucessiva sequência de passos. Este é o princípio que está na base da estimação das distribuições de probabilidade condicional locais, sequencialmente em cada nó da grelha de simulação (Azevedo, 2013). As metodologias de simulação assumem que, num modelo previamente simulado, a variável secundária,  $Z_1(x)$ , é inicialmente calculada para toda a grelha de simulação: seguidamente a variável primária,  $Z_2(x)$ , é co-simulada a partir do procedimento descrito no sub-capítulo anterior (sub-capítulo 2.2.5). A função de distribuição cumulativa (fdc) local, de onde o valor de  $Z_2^s(x)$  é calculado, é definida através da estimação de co-krigagem simples co-localizada (Equação 3) e da variância de co-krigagem (Equação 4). Comparativamente com a co-SSD tradicional, a principal diferença nesta aproximação introduzida por Horta & Soares (2010) é a forma como a fdc condicional,  $F(Z_2(x)|Z_1(x))$ , é amostrada. Assim, o valor de  $Z_2^s(x)$  em vez de ser calculado a partir da fdc global  $F(Z_2(x)|Z_1(x))$ , como na co-SSD tradicional, é calculado através da distribuição condicional local, expressa na seguinte equação (Equação 23) (Horta & Soares, 2010):

$$F[Z_2(u)|Z_1(u) = Z_1(u)^*] = \text{prob}\{Z_2(u) < z|Z_1(u)^*\}K \quad \text{Equação 23}$$

O algoritmo co-SSD com distribuições de probabilidade conjunta, assim como qualquer outro algoritmo de simulação estocástica, permite a reprodução dos valores dos dados experimentais nas suas localizações nos modelos simulados, assegura o modelo de continuidade espacial original e reproduz as funções de distribuição de probabilidade marginal da variável primária. Além disso, este novo algoritmo de co-SSD distingue-se então pela reprodução das distribuições conjuntas, estimadas através dos dados experimentais entre as variáveis primária e secundária,  $F(Z_2(x)|Z_1(x))$ , mesmo quando a distribuição conjunta original é complexa (Azevedo, 2013).

Assim, o procedimento deste algoritmo de co-SSD pode ser sintetizado na seguinte sequência de passos (Horta & Soares, 2010; Azevedo, 2013):

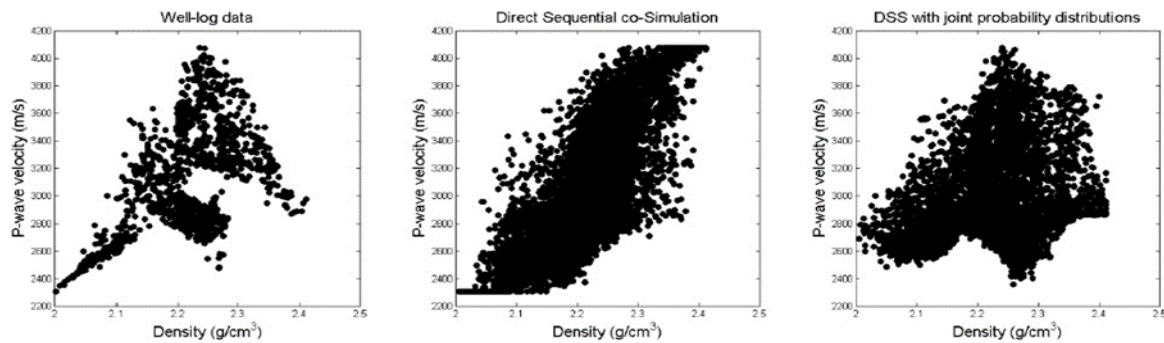
- 1) Estimação da bi-distribuição global,  $F(Z_2(x)|Z_1(x))$ , a partir dos dados experimentais;
- 2) Simulação da variável secundária,  $Z_1(x)$ , através do algoritmo SSD, para toda a grelha de simulação;
- 3) Cálculo dos parâmetros da média local e da variância em,  $x_u$ , com a estimação da co-krigagem simples co-localizada (Equação 5) e correspondente

variância de co-krigagem (Equação 6), condicionados pelos dados experimentais originais  $z_2(x_a)$ , pelos dados simulados previamente  $z_2(x_a)^*$  e pelo valor da variável secundária  $z_1(x_u)^*$ , dentro de uma vizinhança adjacente a  $u$ ;

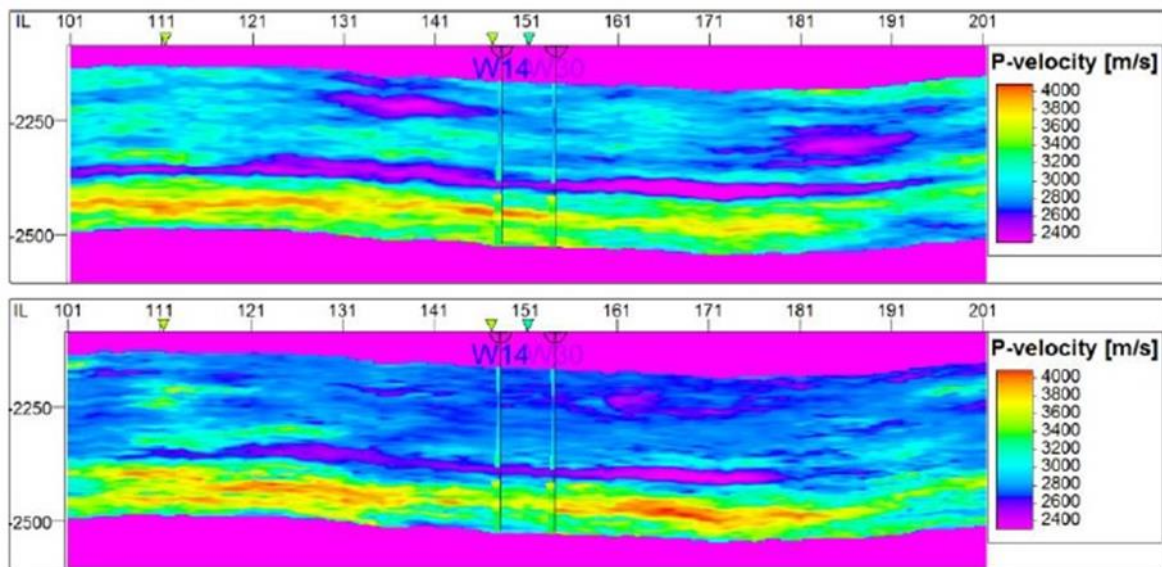
4) Cálculo da fdc,  $F(Z_2(x)|Z_1(x) = z_1^s(u))$ , a partir da distribuição de probabilidade conjunta global,  $F(Z_2(x)|Z_1(x))$ , com base nos valores simulados da variável secundária,  $Z_1^s(u)$ .

5) Simulação do valor  $Z_2^s(u)$ , a partir da fdc condicional,  $F(Z_2(x)|Z_1(x) = z_1^s(u))$ , utilizando a aproximação do algoritmo SSD tradicional.

Assim, os modelos resultantes da simulação estocástica, através da aplicação da co-SSD com distribuições conjuntas de probabilidade, são mais fiáveis e realistas uma vez que asseguram a reprodução espacial das bi-distribuições entre as variáveis primária e secundária (Figura 12, Azevedo, 2013). Através da representação das seções verticais relativas a um determinado modelo de velocidades de ondas P, na Figura 13, verificam-se as diferenças entre a co-simulação de modelos com a utilização da simulação sequencial direta e com a utilização da simulação sequencial direta com distribuições conjuntas de probabilidades. A distribuição conjunta apresenta maior variabilidade e aproximação detalhada, comparativamente com a co-SSD original.



**Figura 12:** Distribuições conjuntas, estimadas a partir de dados de *log* dos poços (à esquerda), resultantes das bi-distribuições entre os modelos co-simulados com a utilização da co-SSD (ao centro) e da co-simulação com distribuições conjuntas de probabilidades (à direita). A utilização do último método permite a reprodução, nos modelos simulados, das bi-distribuições estimadas pelos dados de *logs* dos poços (retirado de Azevedo, 2013).



**Figura 13:** Seções verticais de um determinado modelo de velocidades de ondas P, comparando o modelo co-simulado através da SSD (topo) e da SSD com distribuições conjuntas de probabilidades (base). As bi-distribuições entre a variável secundária e a variável primária, relativamente às duas metodologias de co-simulação, estão representadas na Figura 12 (retirado de Azevedo, 2013).



# **Capítulo III:**

## **Integração de dados de reflexão sísmica nos modelos de subsuperfície**





A caracterização de reservatórios de hidrocarbonetos traduz-se num desafio difícil, uma vez que estes apresentam uma elevada complexidade e heterogeneidade crescente, localizando-se por vezes em zonas cada vez mais profundas. Para uma boa caracterização de reservatórios é imprescindível a integração de um maior número de parâmetros do modelo, a fim de obter uma melhor aproximação da geologia de subsuperfície da Terra.

As áreas de estudo são muito extensas e as propriedades dos dados de poços disponíveis são muitas vezes insuficientes para uma boa caracterização, havendo um escasso conhecimento da geologia real da sub-superfície. Consequentemente, qualquer modelo da sub-superfície da Terra torna-se assim demasiado simplista, essencialmente (e em casos extremos), quando a modelação é realizada recorrendo, exclusivamente, aos dados dos poços (Azevedo, 2013). Nestes casos, os modelos resultantes apresentam uma menor incerteza nas localizações junto aos poços, ao contrário das zonas mais afastadas destes que são menos constrangidas e onde o grau de incerteza é consideravelmente mais elevado (Azevedo, 2013). Esta incerteza associada à estimação de impedâncias nas áreas mais distantes dos poços pode ser reduzida com a integração de dados sísmicos; no entanto torna-se num processo difícil de estimação directa da incerteza sem ser através de processos de simulação geoestatística (Francis, 2006).

Este processo de integração de dados de reflexão sísmica, como variável secundária, permite reduzir a incerteza na modelação da geologia de subsuperfície, uma vez que apresenta uma maior cobertura espacial quando comparada com a dos dados de poço. Contudo, não podem ser utilizados de forma directa juntamente com os dados de poço, pois são resultantes de medições indirectas das propriedades de subsuperfície de interesse (Azevedo, 2013).

### **3.1 Inversão Sísmica Geoestatística**

Ao longo dos últimos anos, as técnicas de inversão sísmica têm sofrido grandes desenvolvimentos, assumindo uma grande contribuição no conhecimento da geologia de subsuperfície, mas também na parte de planeamento e tomada de decisões (monotorização de reservatórios) na indústria petrolífera.

Comparativamente com outros tipos de inversão, algumas técnicas de inversão sísmica estocástica, permitem a integração da informação vertical, com uma variabilidade a pequena escala, presente nos dados dos *logs* dos poços, juntamente com a informação

proveniente da aquisição dos dados de sísmica de reflexão, gerando assim um modelo mais aproximado das propriedades do meio em estudo, utilizando algoritmos geoestatísticos.

O grande objetivo de um estudo associado à utilização de técnicas de inversão sísmica é a inferência de modelos elásticos de subsuperfície, através da utilização de dados de sísmica de reflexão (Azevedo, 2013). Assim o processo de inversão destina-se a gerar um modelo que permita descrever adequadamente um conjunto de dados e deduzir o valor das variáveis em localizações não amostradas (zonas com informação desconhecida). O processo de previsão de uma resposta para um sistema físico particular a ser estudado, designado normalmente por *forward modeling* (modelo direto), pode ser realizado assumindo um modelo físico teórico que explique, globalmente, o referido sistema sob investigação (Azevedo, 2013).

Os problemas inversos geofísicos, em particular o problema de inversão sísmica, têm como objetivo a inferência das propriedades elásticas da geologia de subsuperfície. Os parâmetros do modelo ( $m \in \mathbb{R}^n$ ), resultantes de um conjunto de medições geofísicas indiretas/ observações ( $d_{obs} \in \mathbb{R}^p$ ), são normalmente contaminadas por certos erros ( $e$ ) de medições, provenientes de diferentes fontes (Azevedo *et al.*, 2012). Os dados observados ( $d_{obs}$ ) e as propriedades da subsuperfície de interesse ( $m$ ) estão relacionados com um modelo direto ( $F$ ). A relação entre os dados observados e os modelos da Terra podem ser geralmente traduzidos pela seguinte equação (Equação 24) (Tarantola, 2005; Azevedo *et al.*, 2012):

$$d_{obs} = F(m) + e \quad \text{Equação 24}$$

Adaptando a equação referida ao caso particular de problemas de inversão sísmica, os dados de reflexão sísmica registados (observados) correspondem a  $d_{obs}$  e  $F$  é normalmente definido como o modelo de convolução. Os parâmetros espaciais dos modelos, relativamente às propriedades a serem invertidas dependendo do objetivo da inversão (modelos de impedâncias acústica e/ou elástica, densidade ou de velocidades de ondas P e S), correspondem a  $m$ . O modelo de convolução (*forward model*),  $F$ , relativamente à equação anterior (Equação 24) pode ser definido pela seguinte equação (Equação 25):

$$A = r * w \quad \text{Equação 25}$$

onde  $A$  corresponde às amplitudes sísmicas registadas,  $r$  corresponde aos coeficientes de reflexão da subsuperfície, que são convoluídos com a *wavelet*,  $w$ , e são dependentes das propriedades elásticas (densidade e velocidade das ondas P e S) da geologia de sub-superfície (Azevedo, 2013).

Os problemas de inversão sísmica são não-lineares e de soluções não-únicas devido às limitações intrínsecas do próprio método sísmico: as limitações da largura da banda e resolução dos dados de reflexão sísmica, o ruído, os erros de medição, as aproximações numéricas e condições físicas associadas aos modelos diretos envolvidos (Tarantola 2005; Bosch, Mukerji & González 2010; Tompkins *et al.* 2011; *in* Azevedo, 2013). Por estas razões, os modelos elásticos invertidos, resultantes do processo de inversão sísmica, são apenas uma possibilidade entre vários  $n$  modelos da Terra desconhecidos, que igualmente satisfazem os mesmos dados sísmicos observados (Azevedo, 2013); isto significa que existem diversas soluções aceitáveis para que a convolução da série de refletividades com a *wavelet* combine com a sísmica observada. (Francis, 2005). Assim, se a comparação entre a sísmica registada e a sísmica sintética, calculada a partir dos melhores modelos inversos, for fraca, pode-se concluir que a correlação entre os correspondentes modelos reais elásticos e sintéticos (invertidos) será consequentemente fraca também (Azevedo, 2013). As soluções inversas estocásticas permitem a obtenção de modelos mais heterogêneos e realísticos, características que são extremamente importantes e vantajosas nos modelos elásticos inversos, na medida em que, muitas vezes, são usados nos cálculos de reservas e nas simulações de fluxo de fluidos (Francis, 2006; Bosch, Mukerji & González, 2010; *in* Azevedo, 2013).

Dependendo das limitações associadas, devido à escolha da metodologia de inversão sísmica a utilizar, os modelos inversos recuperados podem ser de impedância acústica e/ou elástica, para dados de sísmica *post-stack*, ou modelos de densidade, de ondas-P e de ondas-S, através de um algoritmo de inversão mais complexo e elaborado, através da inversão de dados de reflexão sísmica *pre-stack* (Francis, 2006). A reflexão sísmica é o método geofísico mais utilizado na prospeção de reservatórios de hidrocarbonetos, uma vez que apresenta como principal vantagem a capacidade de obter informação sobre áreas muito extensas (elevada resolução horizontal). Para além da informação dos dados de reflexão sísmica, que assumem um papel fundamental na interpretação estrutural e geológica de secções (ou perfis) sísmicas, existe ainda a conjugação da informação dos dados de poço.

Os dados de *logs* dos poços fornecem informação concreta e de elevada resolução vertical sobre a geologia de subsuperfície, que contribuem substancialmente para uma melhor interpretação e caracterização de modelos de reservatórios. Quanto mais poços existirem melhor, permitindo, consequentemente, um maior número de dados disponíveis na integração dos processos de inversão sísmica e uma diminuição da incerteza espacial associada aos modelos gerados. Contudo, devido aos elevados custos de perfuração, apenas é possível (na maioria dos casos) a integração de dados de um pequeno número de poços (comparativamente às vastas áreas de estudo), diminuindo a capacidade de inferência das variações laterais das propriedades de um reservatório.

### **3.1.1 Inversão Acústica Geoestatística: Inversão Estocástica Global**

A Inversão Estocástica Global (*Global Stochastic Inversion*, GSI) introduzida por Soares *et al.* (2007) é uma metodologia de inversão geoestatística que utiliza uma aproximação global durante a etapa de simulação estocástica (Azevedo, 2013). Este método de inversão baseia-se num processo iterativo que utiliza o princípio do algoritmo genético (*cross-over*) como técnica de otimização global. A convergência dos modelos inversos para uma função objetivo é executada recorrendo a algoritmos de simulação e co-simulação sequencial (Soares *et al.*, 2007; Azevedo, 2013).

A utilização de elementos geoestatísticos, para a criação e transformação modelos, e de algoritmos de otimização, para a modificação e geração de imagens melhoradas, permite a convergência do processo de inversão (Caetano, 2009). Este grupo de metodologias, como o caso da GSI, realiza uma aproximação sequencial baseada em duas importantes etapas: geração de um conjunto de  $N_s$  modelos de impedância, a cada iteração e para toda a malha sísmica (com base nos dados de poço e na continuidade espacial padrão revelada pelos variogramas); cada modelo é então convolvido com uma *wavelet* estimada, de modo a criar  $N_s$  volumes de sísmica sintética. Esta sísmica sintética gerada é, posteriormente, utilizada na comparação, traço a traço, com a sísmica registada (real ou original) (Soares *et al.*, 2007; Azevedo, 2013).

Esta metodologia geoestatística iterativa permite a inversão de dados sísmicos de reflexão *post-stack* para modelos de impedância acústica (IA), e baseia-se em duas ideias essenciais: a utilização e perturbação dos modelos invertidos através da simulação sequencial estocástica (SSD); e a utilização de um otimizador global baseado num algoritmo genético, através do princípio de *cross-over*, no final de cada iteração (Soares *et al.*, 2007; Azevedo, 2013).

As diferentes etapas do fluxograma desta metodologia geoestatística iterativa (Figura 14) podem ser descritas através do seguinte procedimento (Soares *et al.*, 2007; Azevedo, 2013):

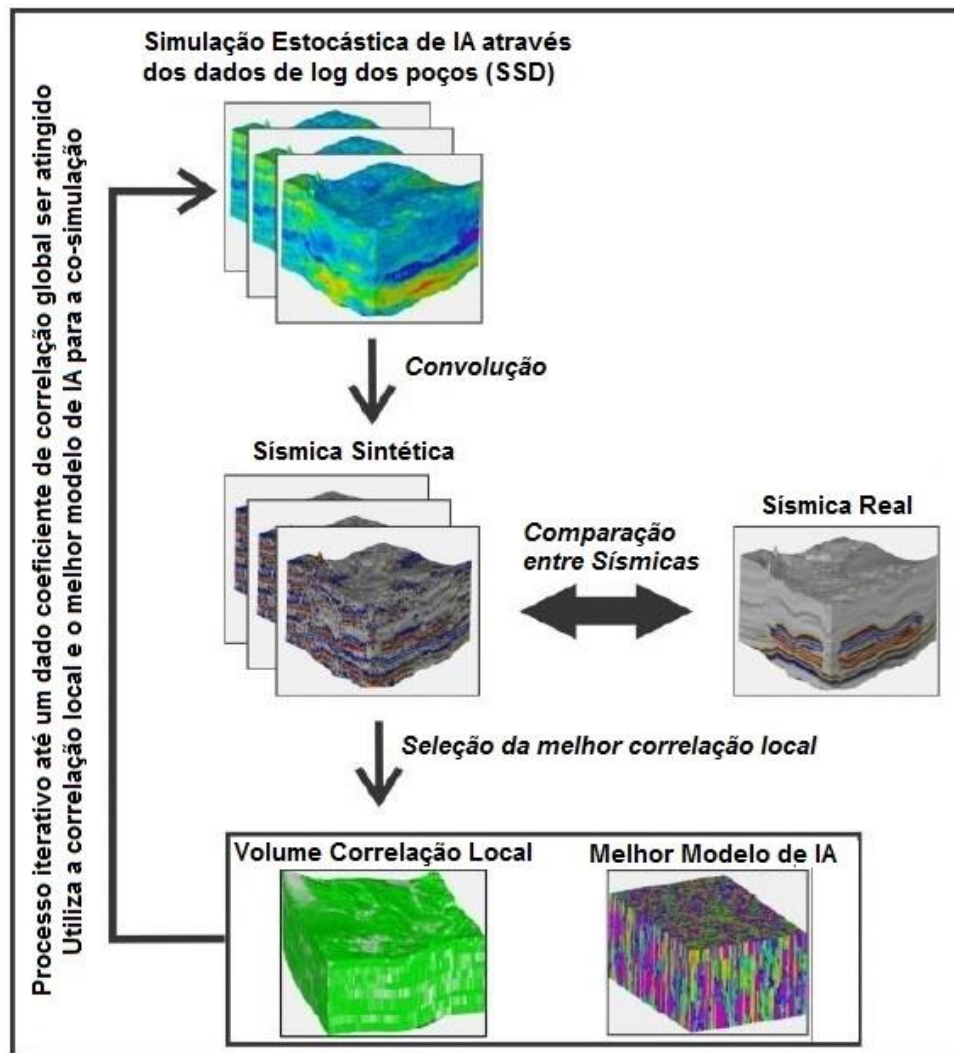
- 1) Geração de um conjunto de  $N_s$  imagens (modelos) de impedância acústica, para toda a grelha sísmica com o algoritmo SSD, condicionado pelos dados de *log* dos poços relativos à propriedade IA;
- 2) Cálculo de um conjunto de  $N_s$  volumes de sísmica sintética, a partir do conjunto de modelos de IA simulados, através do cálculo dos coeficientes de reflexão (CR) de incidência normal (Equação 26). Estes volumes de sísmica sintética são, posteriormente, convoluídos por uma *wavelet* estimada para este particular conjunto de dados sísmicos;

$$CR = \frac{IA_2 - IA_1}{IA_2 + IA_1}$$

Equação 26

onde os índices 1 e 2 correspondem, respetivamente, aos meios acima e abaixo da interface de reflexão considerada.

- 3) Comparação, em termos de coeficiente de correlação, entre cada traço sísmico dos  $N_s$  volumes de sísmica sintética e os respetivos traços da sísmica real para a mesma localização. Do conjunto de modelos de IA simulados, os traços de IA que produzem sísmica sintética com coeficientes de correlação elevados (quando comparados com os traços sísmicos reais correspondentes), são armazenados num volume auxiliar;
- 4) Seleção do melhor volume (cubos) de traços de IA e o melhor volume de coeficientes de correlação (CC) locais, a partir dos volumes auxiliares gerados previamente, sendo utilizados como variáveis secundárias na geração de um novo conjunto de modelos de IA (na iteração seguinte);
- 5) Geração de um novo conjunto de  $N_s$  modelos de IA, através da co-simulação sequencial direta (co-SSD), condicionado pelos dados de IA dos poços (*well-log*) e pelos volumes das variáveis secundárias (volumes de melhor IA e CC locais). Retomar o passo 1) até o coeficiente de correlação global entre os volumes de sísmica sintética e real atingir um determinado valor, concluindo-se assim o processo iterativo.



**Figura 14:** Representação esquemática do fluxograma da metodologia de Inversão Estocástica Global – GSI (retirado de Azevedo, 2013).

### 3.1.2 Inversão Elástica Geoestatística: Inversão Elástica Global

A inversão elástica global (GEI, *Global Elastic Inversion*) foi desenvolvida e implementada por Nunes *et al.* (2012), consistindo numa metodologia de inversão de dados sísmicos *partial post-stack*, através de  $n$  *stacks* de ângulos parciais. Este método de inversão utiliza a mesma metodologia iterativa que o método geoestatístico GSI, durante o processo de perturbação do modelo (Azevedo, 2013). Assim, este método recorre aos algoritmos de simulação sequencial direta (SSD, Subcapítulo 2.2.5) e de co-SSD com distribuições de probabilidade conjunta (Subcapítulo 2.2.6), de modo a inverter e

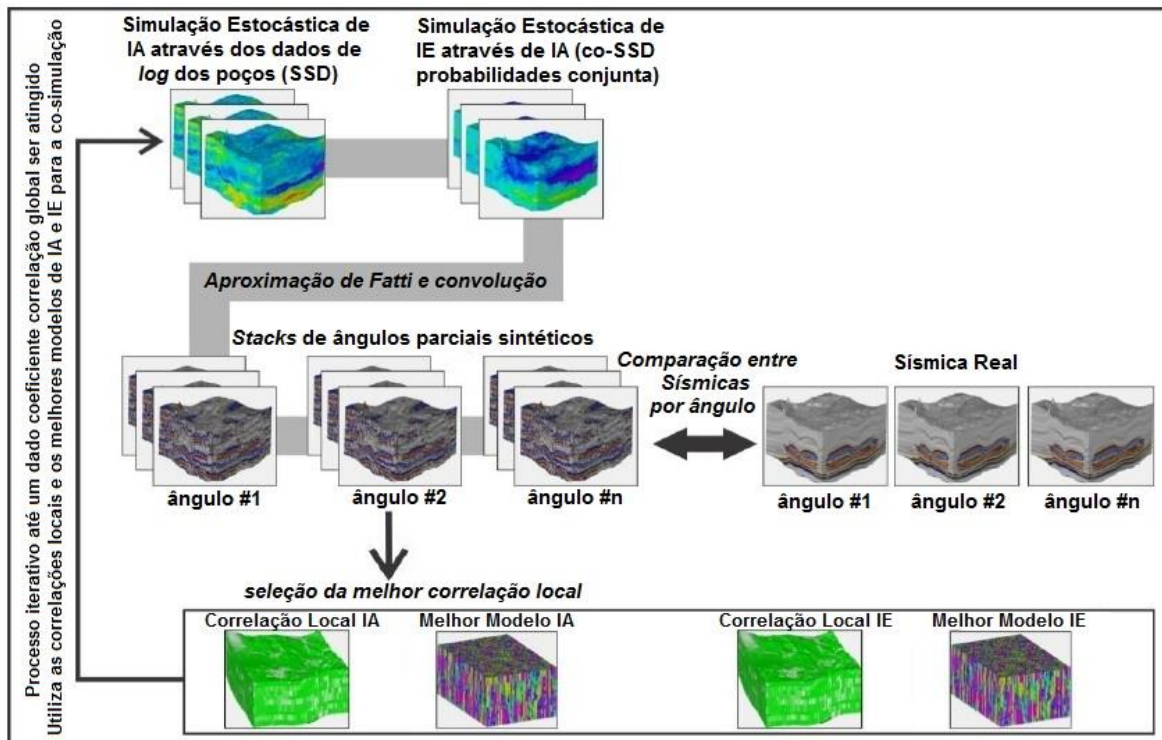
caracterizar, simultaneamente, os modelos de IA e IE, mantendo as relações dos dados observados nos poços (Nunes *et al.*, 2012).

As diferentes etapas do fluxograma da metodologia GEI (Figura 15) podem ser descritas através do seguinte procedimento (Nunes *et al.*, 2012 ; Azevedo, 2013):

- 1) Simulação de um conjunto de  $N_s$  modelos de impedância acústica com o algoritmo SSD, condicionado exclusivamente pelos dados de *log* dos poços relativos à propriedade IA;
- 2) Co-simulação de um conjunto de  $N_s$  modelos de impedância elástica, relativos a cada modelo individual de IA simulado, através da SSD com distribuição conjunta de probabilidades. Cada modelo de IE é condicionado pelos dados de IE dos poços juntamente com o modelo de IA simulado anteriormente;
- 3) A partir dos  $N_s$  modelos de IA e IE, simulados e co-simulados respetivamente, são derivados  $N_s$  *stacks* de ângulos parciais sintéticos, através da aproximação de Fatti *et al.* (1994), de forma a calcular os volumes de coeficientes de reflexão correspondentes. Os  $n$  ângulos parciais sintéticos são gerados a partir da convolução com a *wavelet* dependente-do-ângulo correspondente.
- 4) Comparação entre cada traço sísmico de todos os *stacks* de ângulos parciais sintéticos com o traço sísmico real correspondente, em termos de coeficiente de correlação.
- 5) Armazenamento em dois volumes auxiliares dos modelos de IA e IE, que juntamente produziram um traço sísmico sintético com coeficiente de correlação (CC) mais elevado, relativamente ao traço sísmico real correspondente. Os melhores volumes de IA e IE, juntamente com os volumes de CC locais são utilizados, posteriormente, como variáveis secundárias no processo de co-simulação para gerar um novo conjunto de modelos de impedâncias, durante a iteração seguinte. Assim e após a primeira iteração, tanto o conjunto de modelos de IA como o de IE vão ser condicionados pelos correspondentes dados de *log* dos poços, pelos melhores volumes de IA e IE (respetivamente) e pelos volumes de CC locais. O conjunto de modelos de IE

co-simulados vai ser ainda condicionado pelo modelo de IA simulado nessa iteração.

- 6) Retomar o passo 1) até o coeficiente de correlação global entre os *stacks* de ângulos parciais sintéticos e reais (registados) atingir um determinado valor, concluindo-se assim o processo iterativo de inversão.



**Figura 15:** Representação esquemática do fluxograma da metodologia de Inversão Elástica Global – GEI (retirado de Azevedo, 2013).



# **Capítulo IV:**

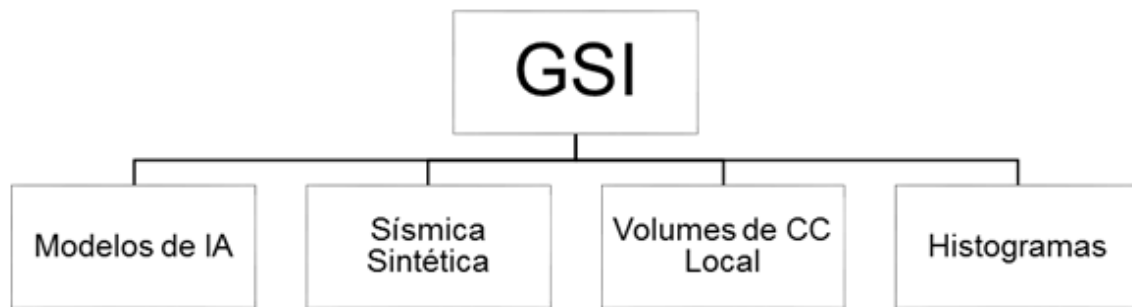
## **Resultados**



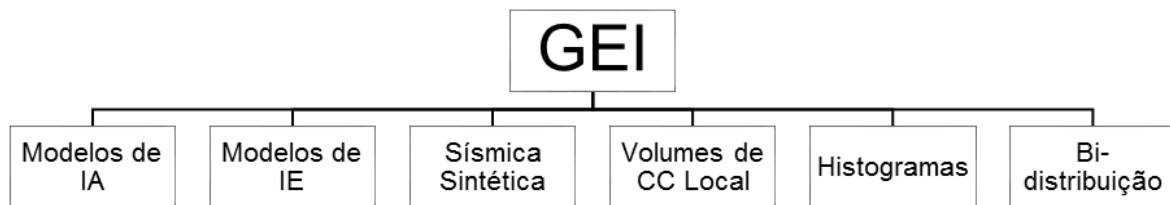
Os resultados apresentados neste capítulo correspondem à inversão de um conjunto de dados sintéticos altamente não estacionários, segundo os seis critérios de zonalidade em estudo. Utilizaram-se duas metodologias de inversão sísmica geoestatística, condicionadas por multi-distribuições locais e modelos de continuidade espacial locais, sendo elas: a Inversão Estocástica Global (GSI; Soares *et al.*, 2007) e a Inversão Elástica Global (GEI; Nunes *et al.*, 2012). Para isso, procedeu-se à realização de seis ensaios distintos entre si para cada uma das metodologias. Para cada um dos ensaios, a malha de reservatório foi dividida em diferentes zonas, assumindo desta forma diferentes momentos estatísticos de estacionaridade. Estes ensaios foram globalmente parameterizados de igual modo relativamente a cada um dos métodos. Para cada um dos ensaios foram efectuadas seis corridas independentes, de forma a obter um resultado com maior significado estatístico (doze ensaios realizados na totalidade para cada uma das metodologias de inversão).

Neste capítulo apresentam-se os gráficos de evolução do coeficiente de correlação global entre os volumes de sísmica sintéticos e real, bem como os modelos designados de “*best\_cc*” e “*best\_AI*”, sendo respetivamente os modelos de correlação (coeficientes de correlação, CC) e os modelos associados à melhor realização de cada ensaio. Os modelos “*best\_AI*”, gerados durante o processo de inversão no final de cada iteração, são o ponto de partida de um novo conjunto de modelos simulados na iteração seguinte.

Resumidamente, e de forma a sintetizar o desenvolvimento prático desta dissertação, estão representados, esquematicamente, todos os resultados obtidos relativos às metodologias geoestatísticas GSI e GEI nas Figuras 16 e 17. Todos os resultados resultantes das metodologias de inversão estocástica foram comparados com os dados originais respetivos, à exceção dos volumes de coeficientes de correlação (CC) local entre a sísmica sintética e a sísmica original. Estes volumes representam a correlação espacial entre os dois tipos de sísmica (original e sintética), através dos coeficientes de correlação local, sendo ainda indicadores da incerteza espacial associada a cada propriedade em estudo.



**Figura 16:** Procedimento de apresentação dos resultados sintéticos obtidos e comparação com os dados originais, relativamente à metodologia de inversão sísmica GSI.



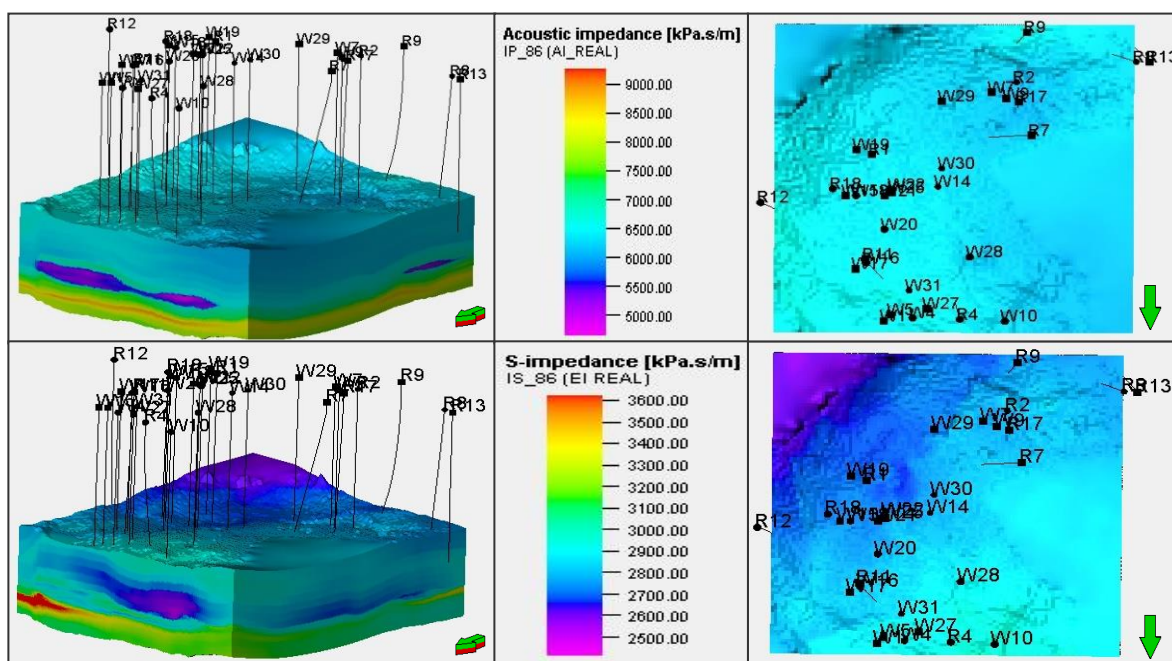
**Figura 17:** Procedimento de apresentação dos resultados sintéticos obtidos e comparação com os dados originais, relativamente à metodologia de inversão sísmica GEI.

## 4.1 Descrição dos Dados Originais

Os dados reais utilizados no âmbito desta dissertação compreendem um conjunto de 32 poços com dados de IA e IE e um conjunto de volumes sísmicos: *fullstack*, *nearstack*, *near-midstack*, *far-midstack* e *farstack*; e wavelets dependentes do ângulo devidamente calibradas para os dados de reflexão sísmica disponíveis. Uma vez que se utilizou um conjunto de dados sintéticos foram também fornecidos os volumes tri-dimensionais originais de IA e IE, os quais foram utilizados exclusivamente para comparar os resultados obtidos da inversão sísmica. É importante referir que os modelos originais de IA e IE são altamente não-estacionários. É facilmente distinguível que a zona de *overburden* é muito menos variável que a zona de reservatório ou a de *underburden* (Figura 18). A necessidade do trabalho apresentado nesta tese prende-se exactamente com este facto: a necessidade de assumir momentos estatísticos de estacionaridade locais.

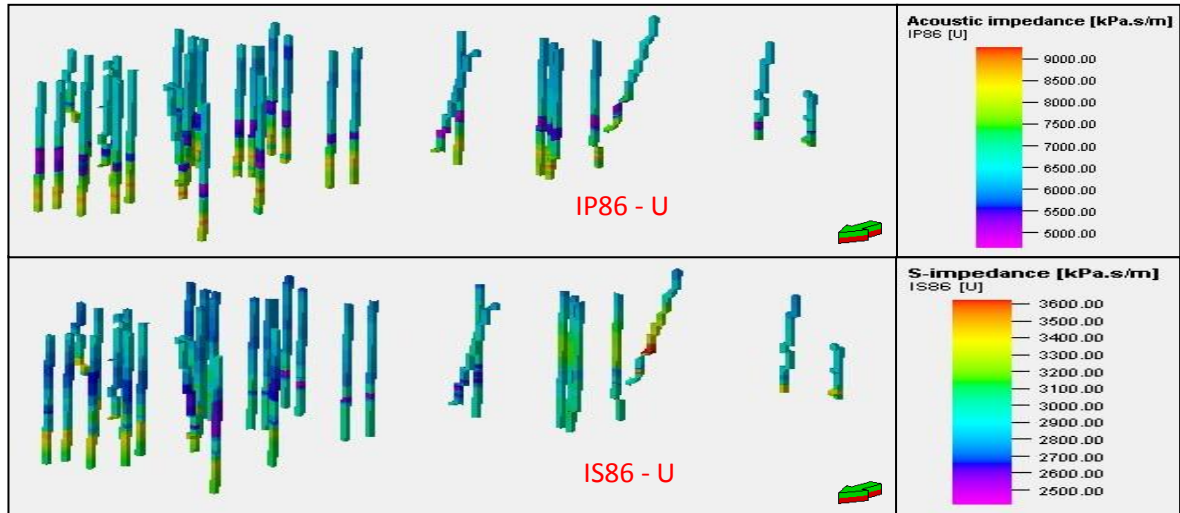
Durante os processos de inversão, utilizaram-se dados de impedâncias acústica e elástica de 32 poços distribuídos por toda a grelha tridimensional a inverter. A malha do reservatório tem 101x101x90 células nas direções i, j e k, respetivamente (Figura 18).

Apesar dos poços designados de R8, R9, R12 e R13 se localizarem mais afastados dos restantes 28 poços e nas extremidades dos modelos (e consequentemente do reservatório), exercem um papel fulcral na diminuição da incerteza espacial das áreas adjacentes aos mesmos, uma vez que a falta de informação de dados, nestas áreas, é significativa.



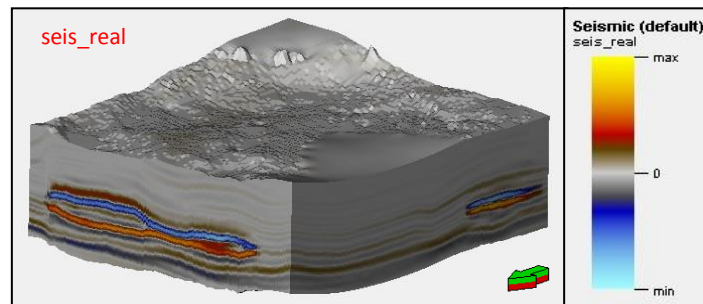
**Figura 18:** Representação dos poços utilizados através das vistas de perfil e topo dos modelos originais de impedância acústica (topo) e de impedância elástica (base).

Uma vez que os dados de *logs* originais têm uma resolução vertical muito maior que os dados de reflexão sísmica foi necessário proceder ao seu *upscaling* (Figura 19). O *Upscaling* foi obtido através da média aritmética dos valores do *log* dos poços que estão localizados dentro de uma mesma célula da malha do reservatório, garantindo, assim, a reprodução dos elementos estatísticos principais (média, variância e valores extremos) estimados a partir dos dados originais dos *logs* dos poços (Azevedo, 2013). Note-se que são os dados de poço *upscaled* que são utilizados no condicionamento da inversão sísmica geoestatística. Consequentemente são os estatísticos destes dados que devem ser reproduzidos no final da inversão geoestatística (Figura 23).



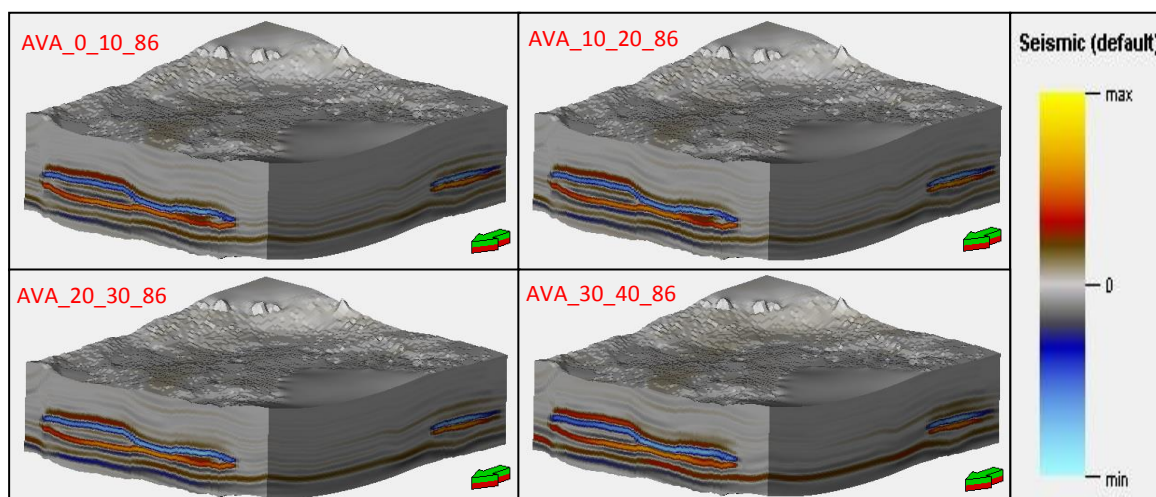
**Figura 19:** Representação dos resultados do *upscaling* nos poços utilizados, através dos modelos originais de impedância acústica (topo) e de impedância elástica (base).

Quanto à integração de dados de reflexão sísmica, foram utilizados dois tipos de sísmica: dados *fullstack* (Figura 20) e dados de *partial post-stack* (Figura 21), tendo sido integrados, juntamente com os dados de poços após o *upscaling*.



**Figura 20:** Representação do modelo de sísmica original de reflexão *post-stack* (*seis\_real*) utilizado durante o processo de inversão, na metodologia geoestatística GSI.

Os dados de reflexão sísmica *partial post-stack* envolvem os ângulos parciais associados e representados em cada um dos modelos (Figura 21). Assim, os ângulos parciais estão compreendidos entre  $0^\circ - 10^\circ$ ,  $10^\circ - 20^\circ$ ,  $20^\circ - 30^\circ$  e  $30^\circ - 40^\circ$ , cujos ângulos parciais médios são, respetivamente,  $5^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $25^\circ$  e  $35^\circ$ . A utilização de volumes *partial post-stack* é essencial para a inferência dos modelos de IE.



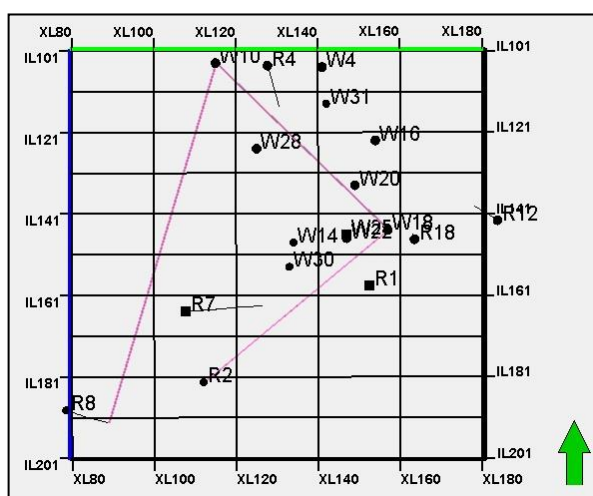
**Figura 21:** Representação dos modelos de sísmica original de reflexão *partial post-stack*: AVA\_0\_10\_86, AVA\_10\_20\_86, AVA\_20\_30\_86 e AVA\_30\_40\_86, segundo os ângulos parciais médios 5°, 15°, 25° e 35°, respetivamente, utilizados durante o processo de inversão, na metodologia geoestatística GEI.

A não-estacionaridade deste conjunto de dados reflecte-se nos dados de reflexão sísmica originais. Os valores maioritários dos dados são valores muito próximos do valor zero essencialmente na zona de *overburden*. As variações dos restantes valores (tanto positivos como negativos) devem-se à mudança significativa de contrastes de impedância que se traduzem em refletores muito bem definidos. A área do reservatório é delimitada pelos dois refletores fortes que correspondem ao topo e à base do mesmo, encontrando-se entre os 2350ms e os 2450ms. Entre o topo do volume sísmico e o topo do reservatório as variações são pouco significativas, uma vez que não existem reflexões bem definidas e os valores médios de impedância pouco variam. A zona do reservatório é que manifesta variações de contrastes de impedância (refletores muito bem definidos), apresentando um coeficiente de reflexão negativo, uma vez que se passa de um meio com valores médios de impedância para um meio com valores baixos de impedância, e um coeficiente de reflexão positivo (na base do reservatório) por acontecer a situação inversa. Finalmente o último refletor deve-se à mudança de valores de impedâncias médias para altas impedâncias, apresentando, novamente, um coeficiente de reflexão positivo.

A estimação da *wavelet* utilizada nos ensaios GSI e GEI está fora do âmbito deste trabalho científico, tendo sido fornecida esta informação para este trabalho. No entanto, é importante realçar e mencionar que, no caso da metodologia de inversão GEI, para cada ângulo parcial médio utilizado deve ser estimada uma *wavelet* representativa do sinal

sísmico referente a cada ângulo ou variação de ângulos específicos. Relativamente à sísmica, nos ensaios GSI utilizaram-se dados de reflexão sísmica *post-stack (fullstack)*, ao contrário dos ensaios GEI em que foram integrados dados sísmicos *partial post-stack*, com o respetivo conjunto de ângulos parciais médios associado.

Nos subcapítulos de apresentação de resultados, tanto para a metodologia GSI como para a GEI, foram criadas seções verticais para os modelos sintéticos de IA, modelos sintéticos de IE, volumes de coeficientes de correlação (CC) local e sísmica sintética (*pre* e *post-stack*). Estas seções verticais atravessaram a grelha tridimensional utilizada, através dos poços R8 – W10 – W18 – R2, está representado na Figura 22.



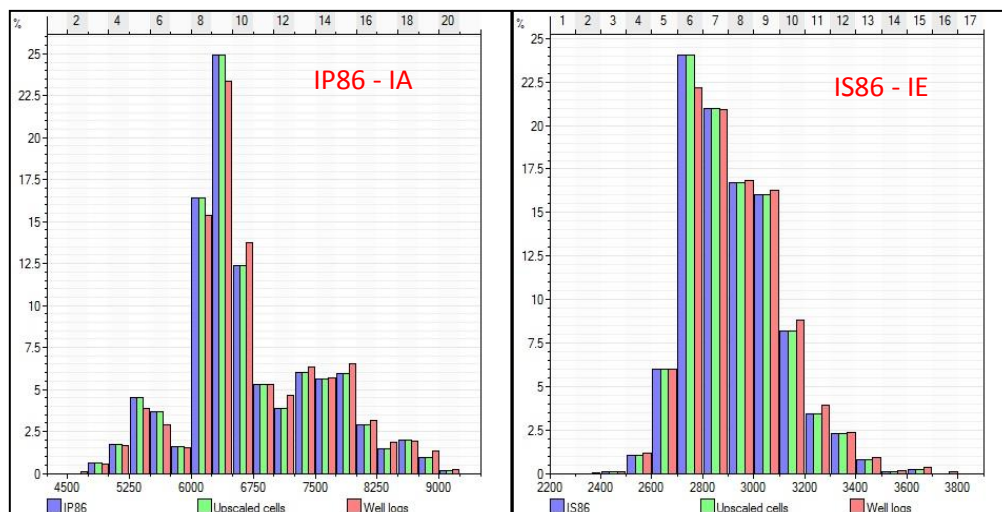
**Figura 22:** Representação do conjunto de poços disponível e a sua localização dentro da grelha 101x101x90. A linha roxa corresponde à localização das seções verticais, utilizadas na apresentação de resultados a fim de comparação entre os dados originais e os dados sintéticos.

#### 4.1.1 Histogramas dos Dados Originais

Uma vez apresentado o conjunto de dados originais utilizados na elaboração desta tese, apresentam-se de seguida os histogramas resultantes da análise univariada dos mesmos dados.

A Figura 23 apresenta os histogramas das distribuições das propriedades de impedância acústica e elástica, relativa aos dados de poço antes e após o *upscaling*. Uma vez que se optou por utilizar metodologias de inversão geoestatística é importante que o primeiro e segundo momento estatísticos do conjunto de dados originais seja reproduzido após o *upscaling*.





**Figura 23:** Representação dos histogramas originais de impedância acústica (esquerda) e impedância elástica (direita).

#### 4.1.2 Representação da bi-distribuição entre os Dados Originais de IA e IE

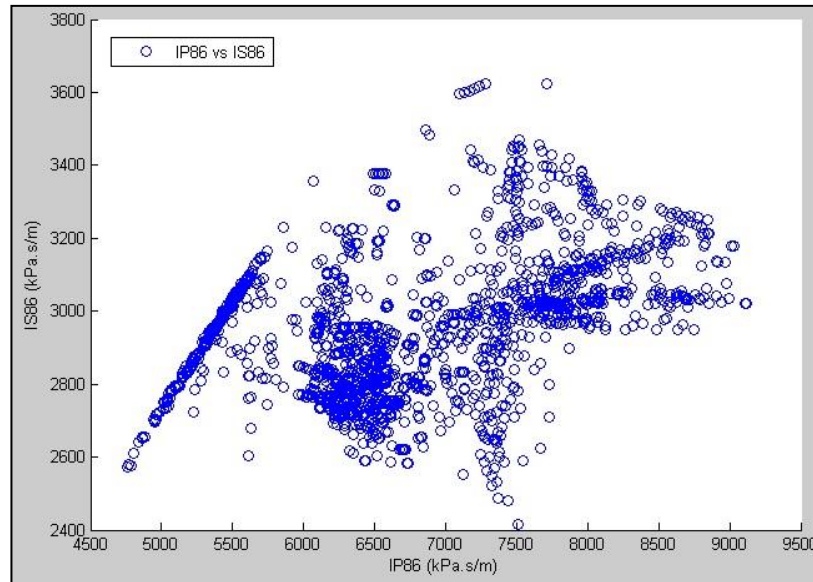
A caracterização de reservatórios é tanto melhor quanto mais informação existir acerca das propriedades petro-elásticas dos dados dos poços. Além disso, de modo a obter condições reais do reservatório ou muito próximas da realidade, é necessário fazer o estudo das relações entre as propriedades em estudo, ou seja, o estudo da bi-distribuição ou distribuição conjunta de propriedades.

Esta tese aborda apenas a distribuição conjunta entre dados de impedância acústica e dados de impedância elástica, referentes à metodologia de inversão geoestatística GEI, que vão ser comparados com a distribuição conjunta dos dados de IA e IE originais de *log* dos poços (Figura 24).

Para uma melhor e mais fidedigna caracterização de reservatórios é importante e necessário assegurar a reprodução destas relações nos modelos invertidos, neste caso, nos melhores pares de modelos invertidos em cada um dos seis ensaios GEI.

A aproximação pela co-simulação sequencial directa padrão (Soares, 2001; *in* Azevedo, 2013), cujo algoritmo (SSD) foi utilizado no método de inversão GSI, não assegura a reprodução das relações entre variáveis primárias e secundárias (distribuição conjunta de propriedades), como se pode verificar na Figura 12 (subcapítulo 2.2.6). Como tal, para a realização dos processos de inversão dos ensaios GEI, foi necessária a utilização de um

algoritmo mais recente e capaz de assegurar a reprodução destas relações: co-simulação sequencial directa com distribuição conjunta de probabilidades (Horta & Soares, 2010; *in* Azevedo, 2013).



**Figura 24:** Representação da bi-distribuição (distribuição conjunta) entre os dados originais de impedância acústica (IP86) e impedância elástica (IS86).

## 4.2 Casos de estudo

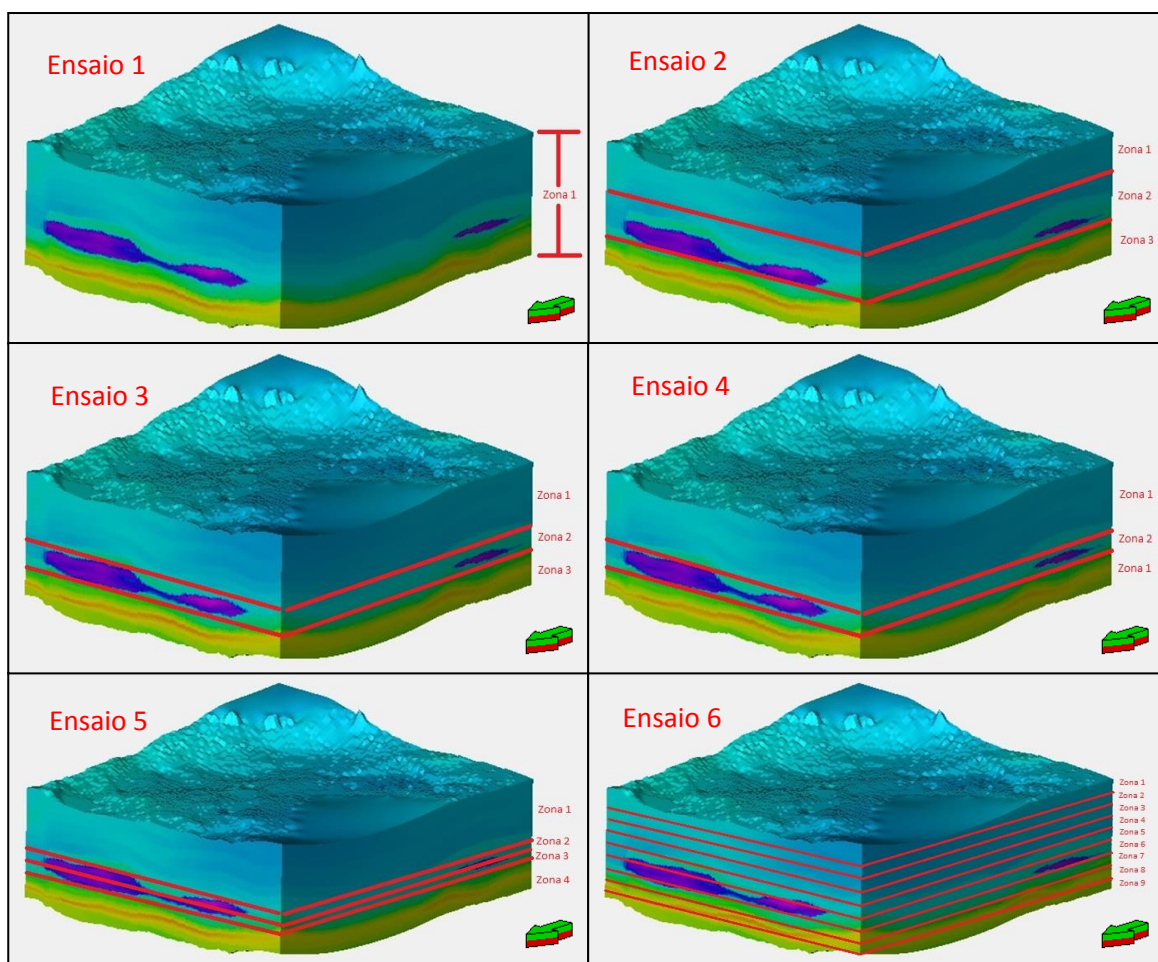
Em cada um dos ensaios considerados para cada método de inversão geoestatística, aplicaram-se diferentes zonalidades na direção vertical (na direção  $k$ ) da grelha tridimensional original (101x101x90 células, nas direções  $i$ ,  $j$  e  $k$ , respetivamente). Cada célula da grelha corresponde à dimensão de 4 metros, na direção vertical,  $k$ . Especificamente, estas zonalidades consistiram na diferenciação de diferentes *layers* ou zonas, tendo estas, dimensões uniformes ou não, dependendo do respetivo critério de divisão em cada ensaio. A divisão em diferentes zonas permite admitir localmente momentos de estacionaridade distintos, o que não é verificado se toda a área de estudo for considerada globalmente.

Ao contrário dos restantes ensaios, o ensaio 1 não sofreu qualquer tipo de divisão, trabalhando-se com o modelo na sua globalidade, ou seja, apresenta apenas uma zona (global) que corresponde ao modelo no seu todo (Figura 25). Este primeiro ensaio assume estacionaridade para toda a área de estudo e representa a aplicação clássica da GSI.

Os ensaios 2 e 3 apresentam zonalidades muito semelhantes (divisão das 90 células verticais em três zonas), diferindo apenas, no número de células que cada zona contém.

O ensaio 2 está dividido em três zonas uniformes (30 células verticais para cada uma das zonas) e o ensaio 3 com três zonas distintas: 45 células para a primeira zona, 17 células para a segunda zona e 28 células para a terceira zona.

Relativamente ao ensaio 4, este apresenta três divisões, tal como no ensaio 3, mas considera-se que a zona 1 (*overburden*) tem as mesmas propriedades estatísticas que a zona 3 (*underburden*), o que não corresponde à realidade (trata-se assim de um modelo com apenas 2 zonas distintas – reservatório e não-reservatório).



**Figura 25:** Divisão por zonalidades dos seis ensaios realizados, para as metodologias de inversão GSI e GEI.

O ensaio 5 está dividido em 4 zonas diferentes, apresentando zonalidades similares às dos ensaios 2, 3 e 4, à exceção da área do reservatório que se encontra subdividida em

duas novas zonas. Assim sendo, o ensaio 5 é constituído por 45 células para a primeira zona, 8 células para a segunda zona, 9 células para a terceira zona e 28 células para a quarta zona.

Quanto ao último ensaio (Ensaio 6), é o caso que expõe um maior número de zonalidades apresentando nove divisões com a mesma dimensão, constituídas por 10 células verticais cada uma.

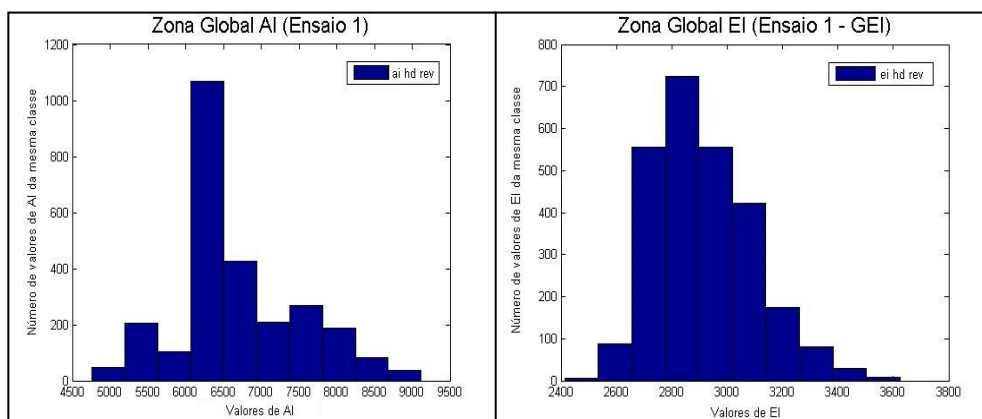
Para cada uma destas zonas foram definidas distribuições de IA e IE locais assim como modelos de continuidade espacial (modelos de variograma) distintos, de forma a garantir estacionaridade, localmente, através de zonas com propriedades estatísticas mais homogéneas (estacionárias).

### 4.2.1 Histogramas Locais

A distribuição univariada das zonas de cada ensaio foram obtidas através do *software Matlab*. Neste subcapítulo, são apresentados apenas os histogramas relativos ao método geoestatístico GEI, uma vez este incluir ambas as propriedades de impedâncias (acústica e elástica) e as zonalidades mantêm-se de um método para o outro. São estas multi-distribuições locais que condicionam os diferentes ensaios nas metodologias de inversão estocástica.

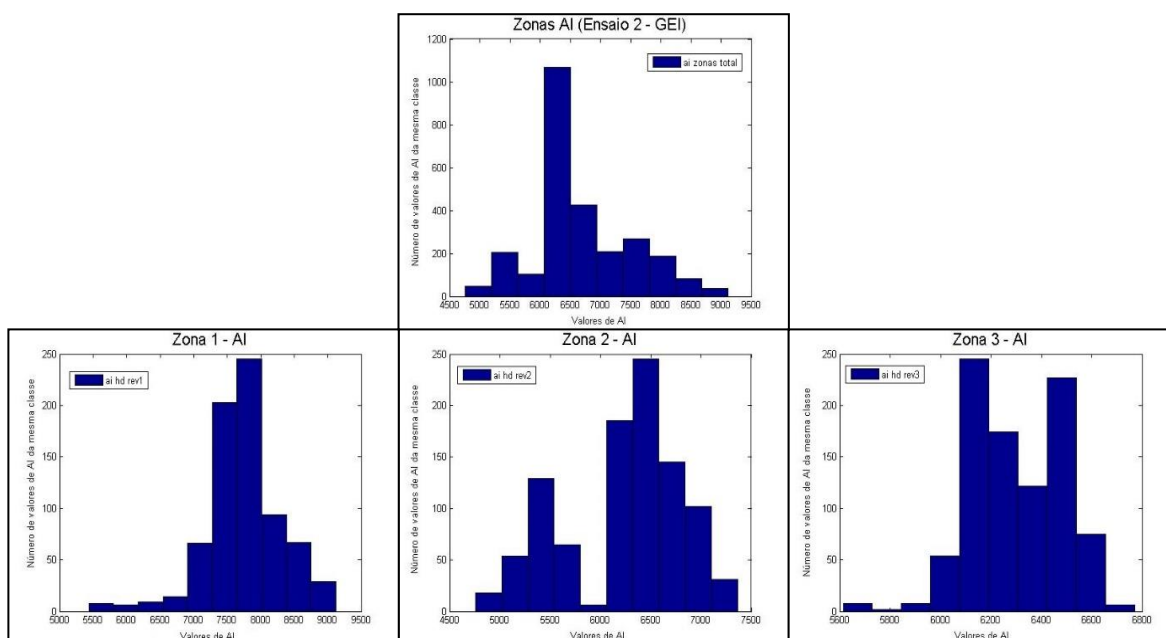
A soma de valores dos diferentes histogramas vai gerar o histograma global da propriedade em estudo. Este histograma global será igual aos histogramas de valores de impedâncias (acústica e elástica) relativos aos dados de poço originais, preservando, assim, os elementos estatísticos nas diversas distribuições globais de cada ensaio, evitando deste modo o enfiamento dos resultados obtidos.

No ensaio 1, como seria de esperar, os histogramas de distribuição globais são iguais aos histogramas dos dados de poço originais, uma vez que se tratou de um processo de inversão sísmica com uma zonalidade global (sem qualquer divisão). A maior distribuição de valores de impedâncias acústica e elástica concentraram-se nos intervalos de 6000 – 6500 kPa.s/m e 2800 – 3000 kPa.s/m, respetivamente (Figura 26).



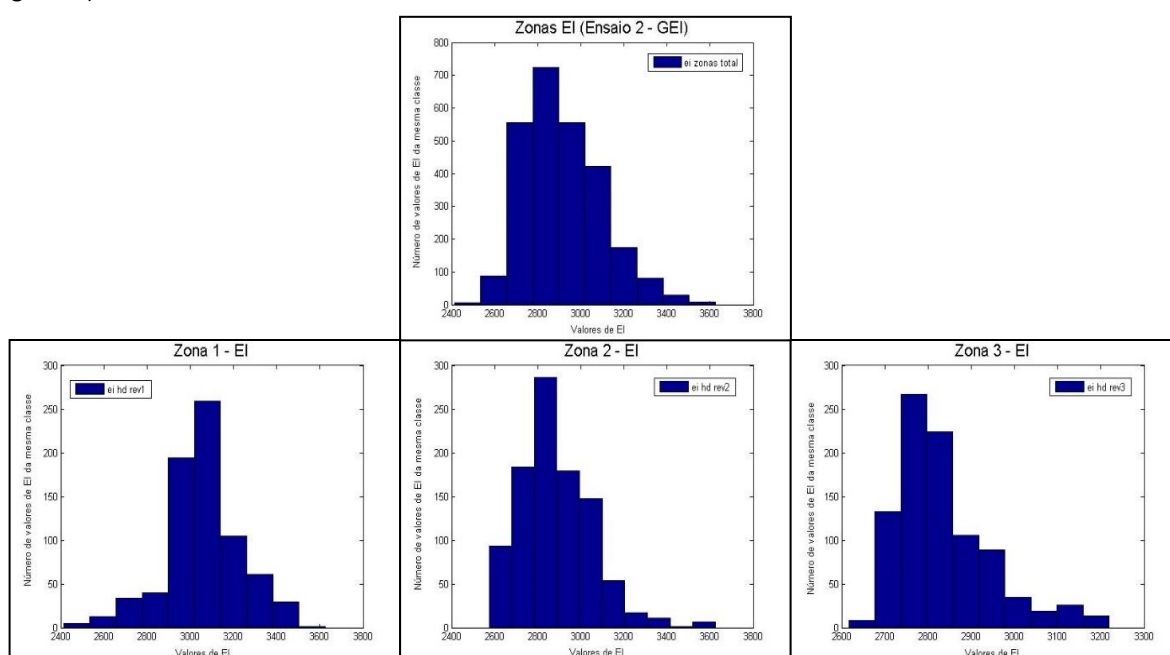
**Figura 26:** Histogramas das zonas globais relativos às propriedades de impedâncias acústica e elástica do ensaio 1.

Na primeira zona do ensaio 2, Figura 27, a maioria dos valores representam valores de impedância acústica altos, no intervalo dos 7500 – 8000 kPa.s/m, havendo alguns valores baixos e médios de impedância, mas que no global se tornam residuais. O histograma da zona 2 representa o cenário oposto com um grupo de valores baixos de impedância e outro com valores médios, rondando os valores de 5500 e de 6500 kPa.s/m, respetivamente. A última zona apresenta basicamente valores médios de impedância no intervalo dos 6100 – 6600 kPa.s/m, não existindo praticamente um significativo número de valores baixos e altos de IA. É de realçar o facto de a segunda zona não manifestar qualquer tipo de valores na classe adjacente aos 6000 kPa.s/m, contrastando com a mesma classe do histograma global (que é a classe maioritária de valores).



**Figura 27:** Histogramas das três zonas e respetivo histograma global relativos à propriedade de impedância acústica do ensaio 2.

Os histogramas das três zonas de impedâncias elásticas do ensaio 2 não apresentam grandes variações de valores entre si, comparando com os valores de IA anteriores do mesmo ensaio. Através da Figura 28, observa-se que na zona 1, a classe maioritária de valores é a dos 3000 – 3100 kPa.s/m; na zona 2 é a dos 2800 – 2900 kPa.s/m e a da zona 3, apesar de ligeiramente inferior, é a dos 2750 – 2800 kPa.s/m. É de realçar que o histograma da zona 2, que corresponde à zona do reservatório, apresenta a mesma classe maioritária (2800 – 2900 kPa.s/m) que o histograma global, assim como as restantes classes que apresentam distribuições de valores similares (apesar das classes do histograma global apresentarem conjuntos com maior número de valores, pois é global).



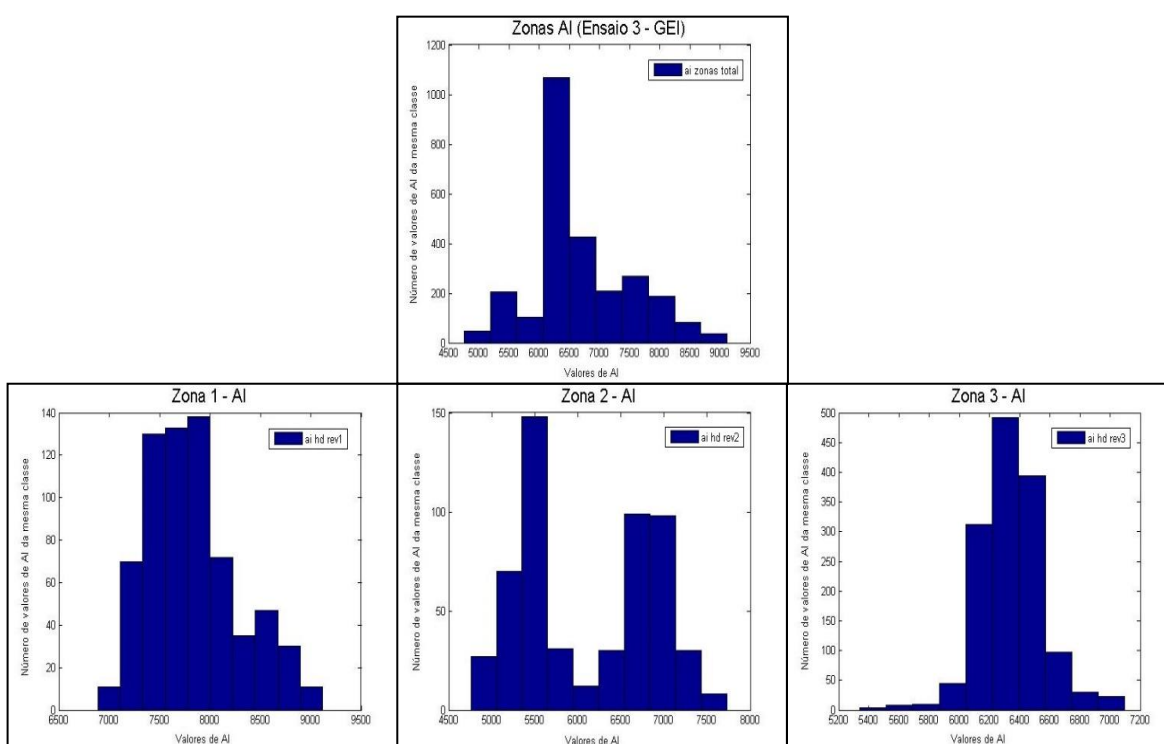
**Figura 28:** Histogramas das três zonas e respetivo histograma global relativos à propriedade de impedância elástica do ensaio 2.

Na zona 1 de IA do ensaio 3 (Figura 29), a maioria dos valores estão representados no intervalo dos 7000 – 8000 kPa.s/m, em que o número de valores (nestas classes deste intervalo) é muito similar, existindo ainda alguns valores de impedância nas classes de valores mais altos. Relativamente à zona 2, o histograma, que abrange a área do reservatório, apresenta um conjunto de valores baixos de impedância acústica (5250 – 5500 kPa.s/m) e outro com valores médios / altos (6500 – 7250 kPa.s/m). A terceira e última zona apresenta maioritariamente valores médios de impedâncias, no intervalo dos 6000 – 6600 kPa.s/m, não existindo, de forma significativa, qualquer classe de valores baixos e altos de IA. O histograma da segunda zona não chega ao caso extremo de não

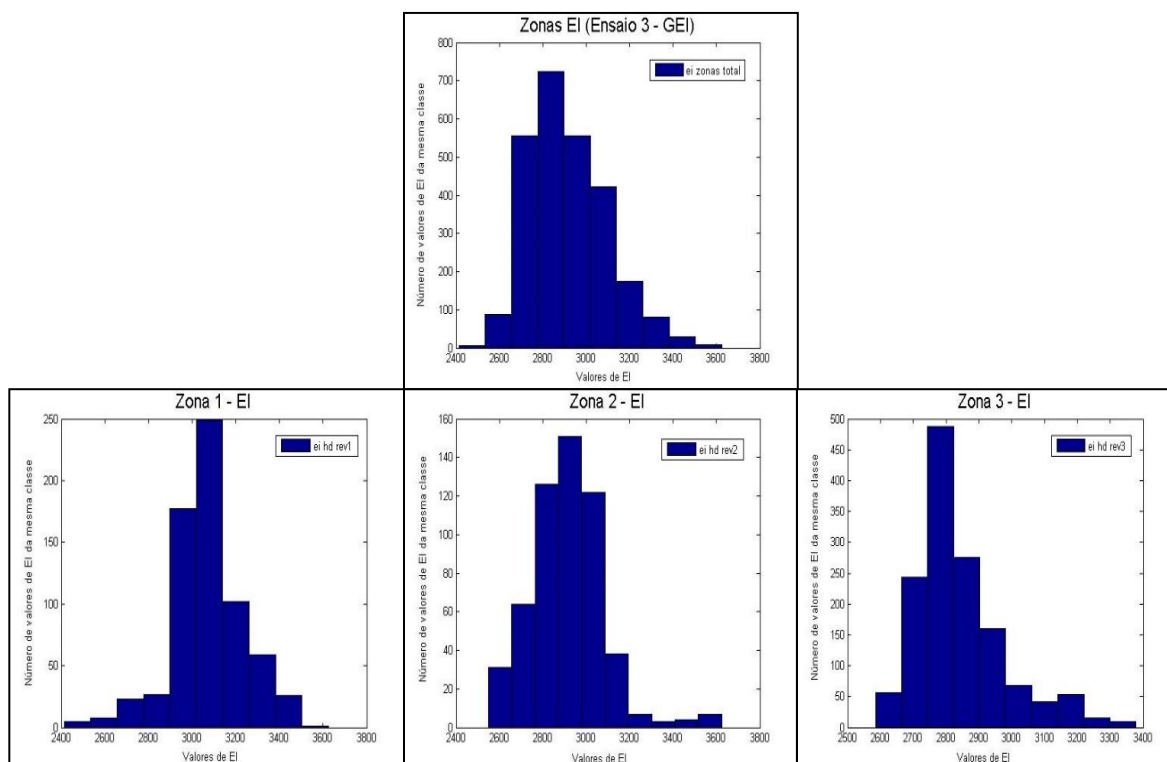


apresentar valores na ordem dos 6000 kPa.s/m (como aconteceu na zona 2 de IA do ensaio anterior), no entanto, manifesta-se novamente como uma das classes com menor conjunto de valores.

Observando a Figura 30, verifica-se que, na zona 1, a classe que apresenta um maior conjunto de valores é a dos 3000 – 3100 kPa.s/m. No histograma da zona 2, a classe dos 2800 – 2900 kPa.s/m coincide novamente com a classe maioritária do histograma global, apesar das distribuições das restantes classes não apresentarem grande semelhança (à exceção das duas classes adjacentes). Em relação à última zona, a classe dominante é a dos 2700 – 2800 kPa.s/m, ligeiramente inferior à das restantes duas zonas. De um modo geral e apesar das distribuições de valores de impedâncias não serem iguais entre si nem com o histograma global, o maior conjunto de valores mantém-se próximo (2800 – 3100 kPa.s/m) em todas as zonas, não havendo grandes variações relativamente ao histograma de zonas global.



**Figura 29:** Histogramas das três zonas e respetivo histograma global relativos à propriedade de impedância acústica do ensaio 3.

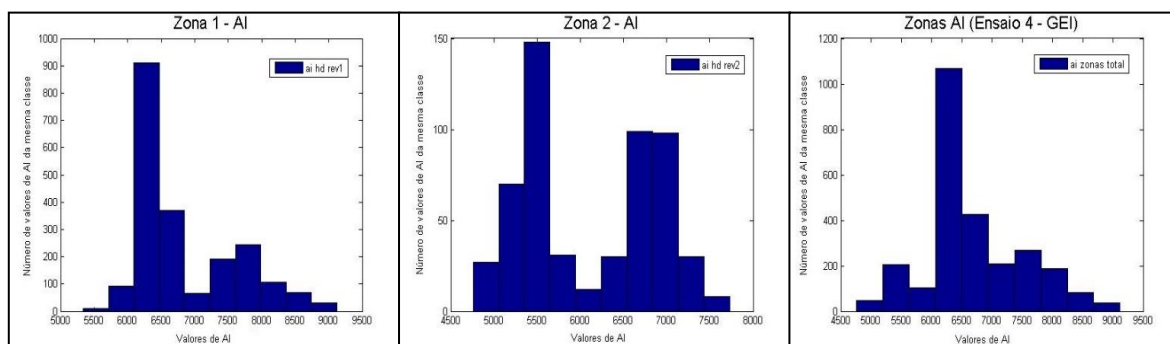


**Figura 30:** Histogramas das três zonas e respetivo histograma global relativos à propriedade de impedância elástica do ensaio 3.

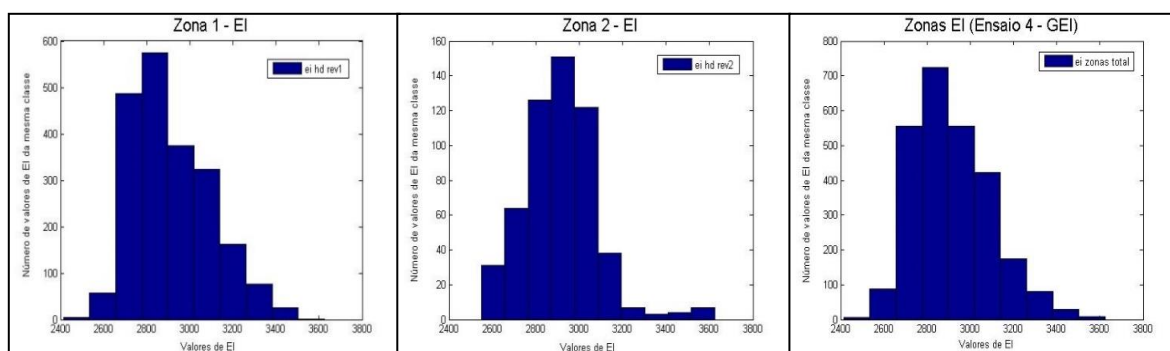
O ensaio 4 (Figura 31) só apresenta duas zonalidades, em que a zona 1 abrange o conjunto de valores altos e médios de impedâncias e o seu histograma local vai ser muito semelhante ao histograma de zonas global de AI. Uma vez que só a zona do reservatório é que não faz parte desta zona 1, o seu histograma local não engloba essencialmente os valores baixos de impedâncias deste ensaio. O histograma da zona 2 apresenta dois conjuntos de valores: um de baixas impedâncias, concentrado na classe dos 5250 – 5500 kPa.s/m, e outro de médias impedâncias acústicas, entre as classes dos 6500 – 7250 kPa.s/m.

Quanto aos histogramas de distribuição de valores relativos a impedâncias elásticas, observando a Figura 32, pode-se concluir que tanto a zona 1 como a zona 2 apresentam distribuições em todas as classes entre os valores de 2500 – 3500 kPa.s/m (independentemente de umas classes serem constituídas por mais ou menos valores). Relativamente à zona 1, a classe maioritária (2800 – 2900 kPa.s/m) mantém-se a mesma do histograma global, ao passo que na zona 2, vai concentrar os seus valores na classe dos 2900 – 3000 kPa.s/m.





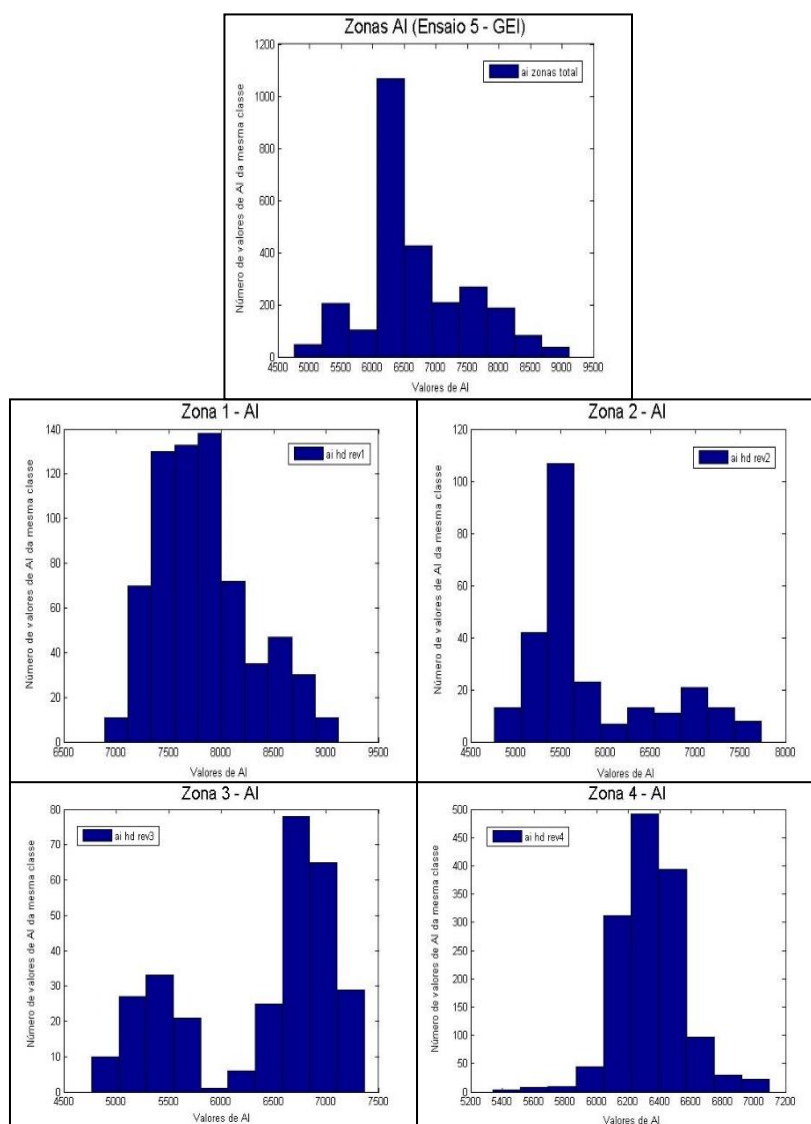
**Figura 31:** Histogramas das duas zonas e respetivo histograma global relativos à propriedade de impedância acústica do ensaio 4.



**Figura 32:** Histogramas das duas zonas e respetivo histograma global relativos à propriedade de impedância elástica do ensaio 4.

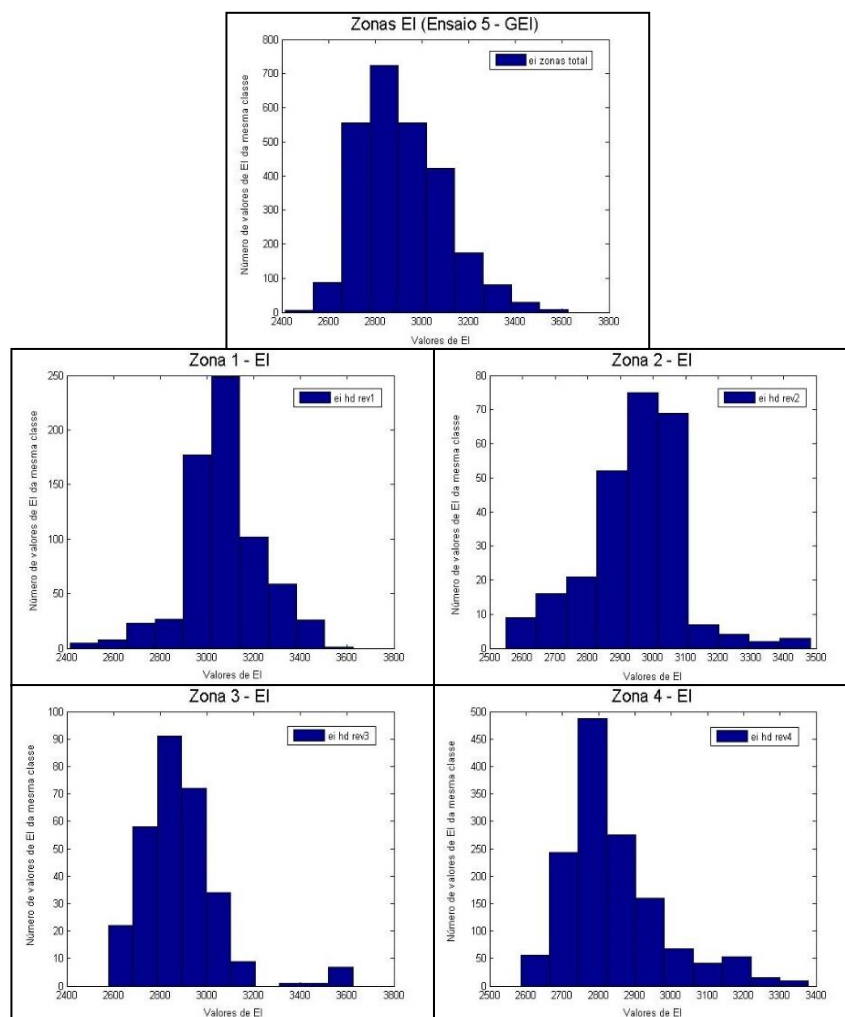
Os histogramas de impedância acústica das zonas 1 e 4 do ensaio 5 (Figura 33) vão ser semelhantes aos das zonas 1 e 3 do ensaio 3 (Figura 29), uma vez que as divisões são as mesmas, à exceção da zona do reservatório, que neste ensaio se encontra dividida em duas (zona 2 e zona 3).

Relativamente à zona 1, o histograma apresenta valores altos de impedância, concentrando-se as maiores distribuições entre as classes dos 7250 – 8000 kPa.s/m. Os histogramas das zonas 2 e 3 apresentam valores baixos e médios / altos de impedâncias, em que a maior concentração de valores baixos de IA encontram-se na zona 2, na classe dos 5250 – 5500, e a de valores médios / altos encontra-se na zona 3, na classe dos 6500 – 6750 kPa.s/m. A última zona (zona 4) manifesta essencialmente valores médios entre as classes dos 6000 – 6600 kPa.s/m, as restantes classes do histograma não apresentam distribuições significativas.



**Figura 33:** Histogramas das quatro zonas e respetivo histograma global relativos à propriedade de impedância acústica do ensaio 5.

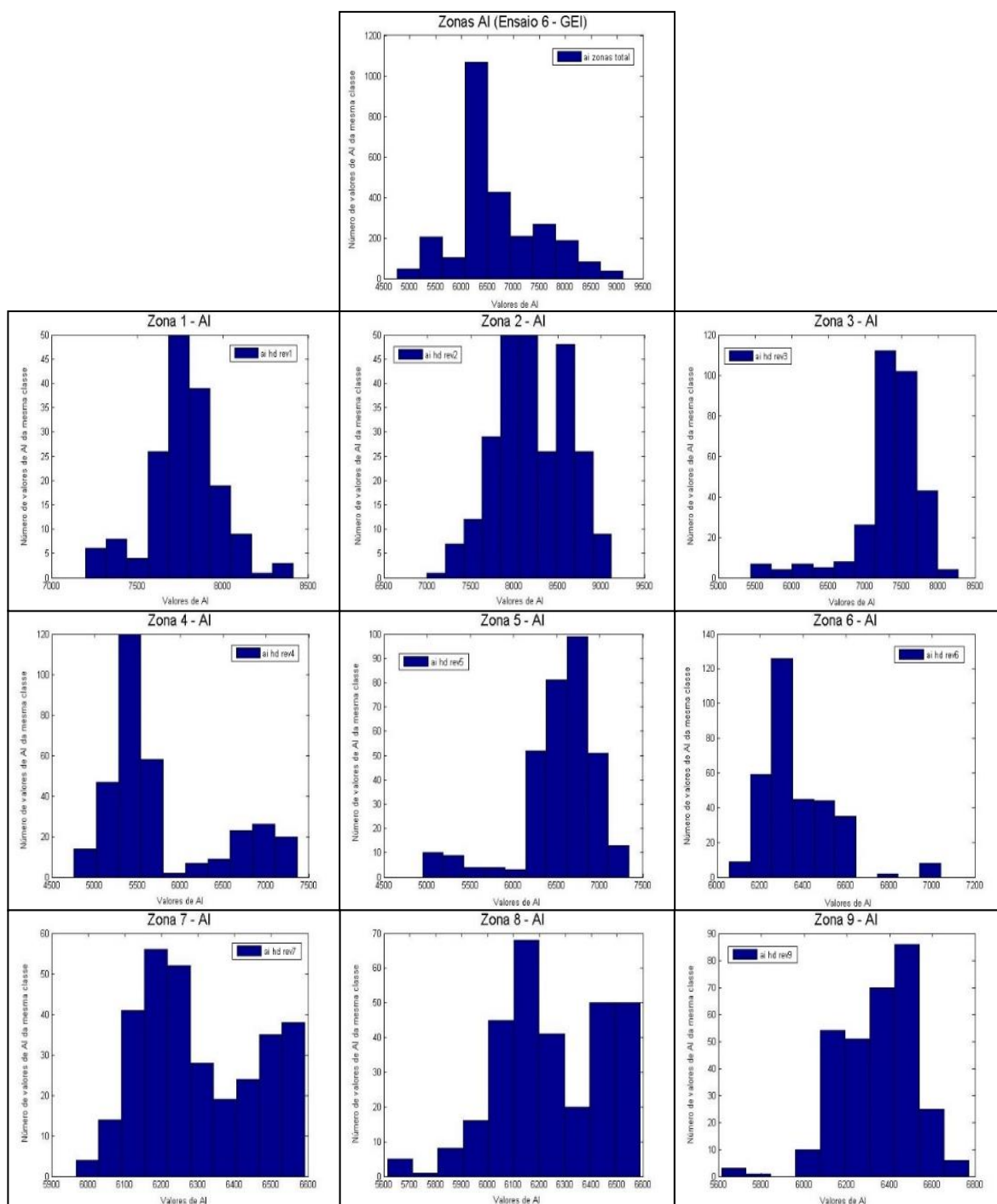
Os histogramas zonais de impedância elástica (Figura 34) apresentam distribuições distintas entre si e comparativamente com o histograma global, no entanto todos eles apresentam a sua classe maioritária igual ou muito próxima à do histograma global de zonas. A zona 1 apresenta a maior distribuição de valores na classe dos 3000 – 3100 kPa.s/m e a zona 4 na classe dos 2750 – 2800 kPa.s/m. Quanto aos histogramas da área de reservatório, zonas 2 e 3, estes apresentam maior conjunto de distribuição de valores nas classes dos 2900 – 3000 kPa.s/m e dos 2800 – 2900 kPa.s/m, respetivamente.



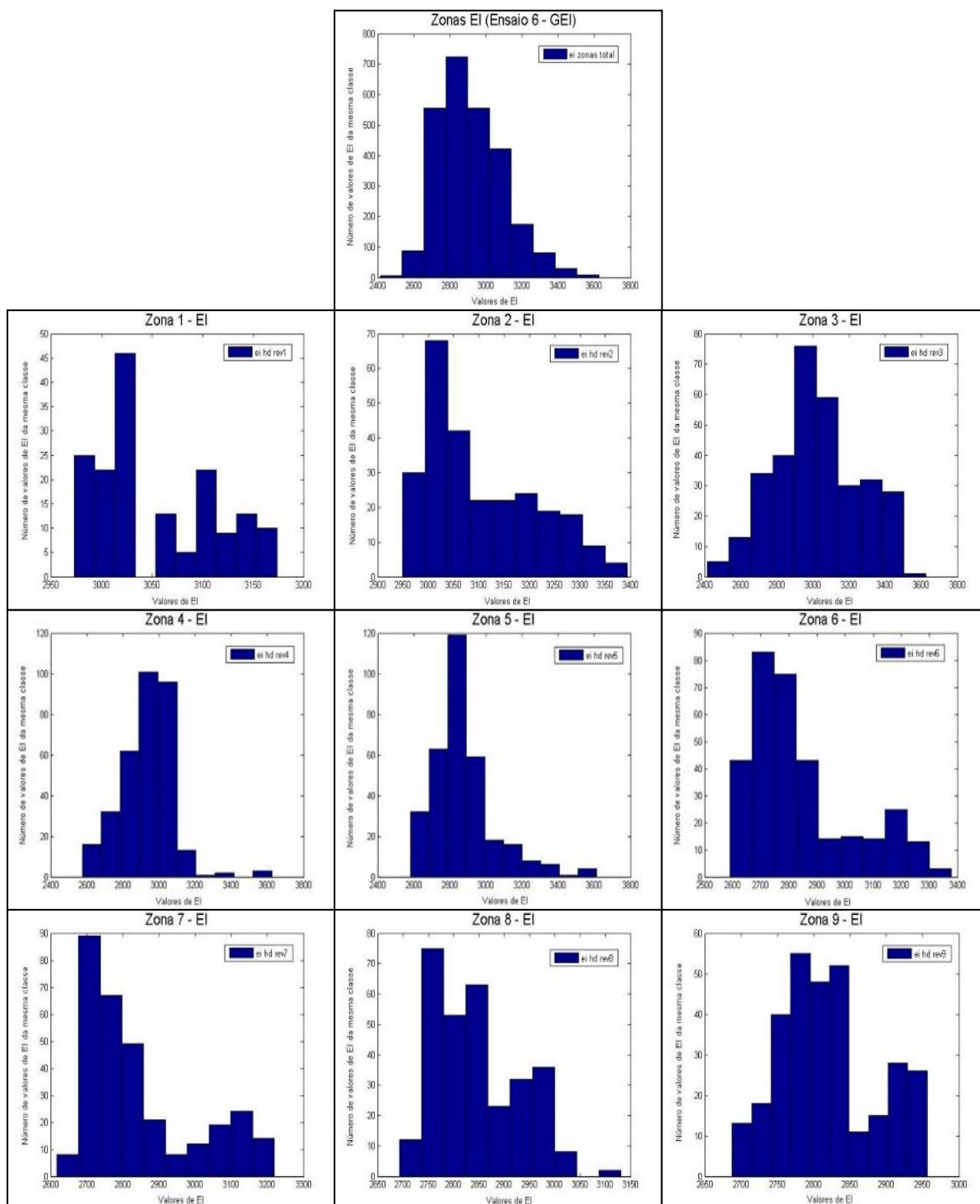
**Figura 34:** Histogramas das quatro zonas e respetivo histograma global relativos à propriedade de impedância elástica do ensaio 5.

Relativamente ao último ensaio, os nove histogramas zonais apresentam distribuições distintas mas apresentam algumas similaridades entre si, como se pode verificar na Figura 35. Os histogramas das zonas 1, 2 e 3 apresentam maioritariamente valores altos de impedância acústica na ordem dos 7500 – 8000 kPa.s/m; no caso da zona 2, os valores de IA chegam a atingir os 9000 kPa.s/m. As zonas 4, 5 e 6 (e possivelmente uma parte da zona 7) manifestam, nos seus histogramas, valores baixos e médios de impedâncias, uma vez que abrangem toda a área de reservatório e ainda áreas já fora do mesmo. O histograma da zona 4 é o que apresenta um maior número de classes de valores baixos de impedância, ao contrário das zonas 5, 6 e 7 que apresentam maior número de valores médios de IA (essencialmente a zona 7). Os valores da classe maioritária (6000 – 6500 kPa.s/m) do histograma global de zonas deve-se,

maioritariamente, às distribuições de valores médios de IA das classes dos histogramas das zonas 8 e 9, visto apresentarem valores de IA no intervalo de 6000 – 6600 kPa.s/m.



**Figura 35:** Histogramas das nove zonas e respetivo histograma global relativos à propriedade de impedância acústica do ensaio 6.



**Figura 36:** Histogramas das nove zonas e respetivo histograma global relativos à propriedade de impedância elástica do ensaio 6.

Os histogramas da Figura 36, relativos às impedâncias elásticas do ensaio 6, são discrepantes entre si e o histograma global de zonas, no entanto, é a zona 5 que melhor representa a classe maioritária de valores de IE do histograma global (2800 – 2900 kPa.s/m). Quanto aos histogramas das zonas 1, 2, 3 e 6, estes representam a maioria

dos valores de IE acima dos 3000 kPa.s/m, apesar do histograma da zona 6 apresentar o seu pico de valores na classe dos 2700 – 2800 kPa.s/m e do histograma da zona 3 apresentar, também classes de valores médios de impedâncias e alguns valores baixos residuais (é a única zona do ensaio com valores de IE a rondar os 2400 – 2500 kPa.s/m). O histograma da zona 7 apresenta uma classe maioritária de valores na ordem dos 2700 – 2750 kPa.s/m, ao contrário dos histogramas das zonas 8 e 9, aos quais, essa mesma classe sofre de escassez de valores de impedâncias. Contudo, as últimas duas zonas do ensaio apresentam histogramas com várias classes de valores médios de IE entre os 2700 – 3000 kPa.s/m, assegurando assim a maioria dos valores médios do histograma global de zonas.

### 4.2.2 Variogramas Locais

A modelização de variogramas foi uma das etapas fundamentais deste trabalho permitindo o ajuste de modelos teóricos (subcapítulo 2.1.3) aos vários variogramas experimentais correspondentes a cada zona em que a área de estudo foi dividida, relativamente à continuidade espacial das propriedades acústica e elástica. Para que fosse possível o cálculo e modelização dos vários variogramas foi utilizado o *software* “*geoMS*” (*Geostatistical Modelling Software*).

A modelização dos variogramas experimentais foi calculada através dos dados de *logs* dos poços para IA e IE, após o *upscaling* no conjunto de dados originais de *logs* dos poços. A modelização foi padronizada para todas as zonas dos ensaios, facilitando desta forma o procedimento, ao contrário do cálculo dos variogramas, em que, à exceção das direções, a classe de ângulos e as distâncias nem sempre puderam ser as mesmas. Devido ao baixo número de poços e essencialmente à grande distância entre eles, os variogramas experimentais horizontais foram, em certa medida, difíceis de obter uma boa continuidade espacial. Como tal, para modelizar a continuidade espacial de cada propriedade, utilizaram-se variogramas horizontais omnidirecionais (N-S) como direção máxima e variogramas com direção perpendicular a estes (E-W) como direção mínima, estimados directamente a partir dos volumes sísmicos. Ao contrário dos horizontais, os variogramas verticais foram mais fáceis de calcular devido à elevada resolução vertical e número de amostras fornecidas pelos dados de *logs* dos poços.

Relativamente às características de modelização, foram sempre utilizados modelos esféricos com duas estruturas, em que a primeira estrutura com uma pequena amplitude e uma contribuição elevada de ajuste ao variograma experimental, e a segunda

correspondia com uma amplitude muito grande e uma contribuição de modo a perfazer e atingir o patamar (*sill*) total. Os variogramas experimentais horizontais nunca atingiram o patamar devido às diferentes zonas e heterogeneidades da área em estudo, ou seja, em termos de distribuição espacial, as propriedades a modelar são não-estacionárias. Estes parâmetros dos variogramas foram utilizados para os algoritmos de simulação sequencial procedimento de ambos os métodos geoestatísticos. Os variogramas referentes às diferentes zonalidades dos ensaios GSI e dos ensaios GEI são apresentados no Anexo I e Anexo II, respetivamente.

### **4.3 Ensaios com Inversão Estocástica Global (GSI)**

Neste subcapítulo vão ser apresentados os resultados obtidos para cada ensaio, através da aplicação do método geoestatístico GSI (*Global Stochastic Inversion*), após um processo iterativo constituído por 6 iterações. A cada iteração, 16 conjuntos de modelos de impedância acústica (IA) foram sequencialmente simulados recorrendo ao algoritmo de simulação sequencial estocástica (SSD, Simulação Sequencial Directa).

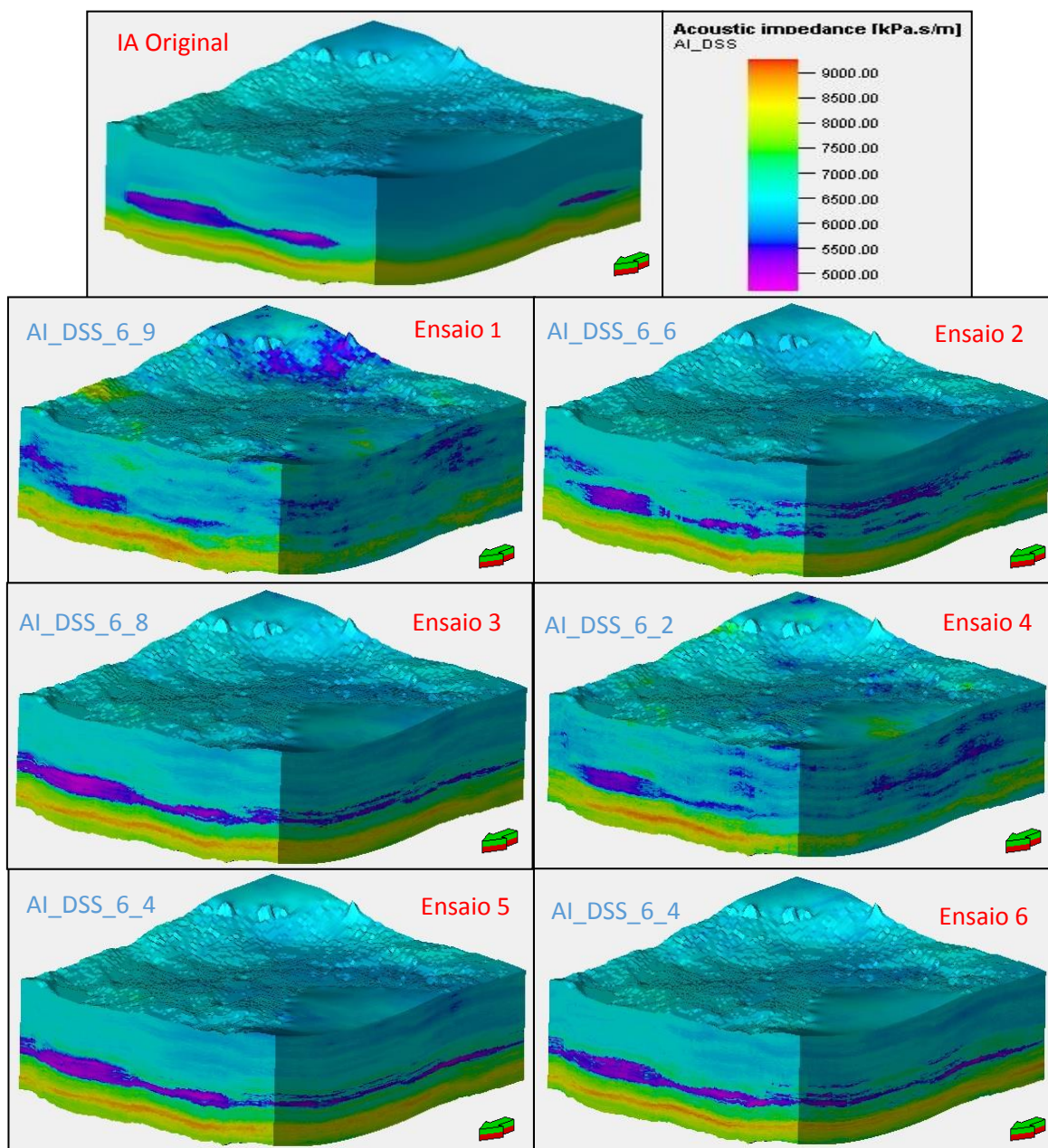
#### **4.3.1 Modelos Sintéticos de Impedância Acústica**

Apesar dos processos de inversão sísmica terem simulado um conjunto de 16 modelos, a cada nova iteração, apresentam-se apenas os melhores modelos de cada ensaio relativos à última iteração (Figura 37).

Todos os modelos de IA simulados, durante todo o processo iterativo de inversão geoestatística, reproduzem os valores da propriedade dos dados condicionantes nas suas localizações; os principais elementos estatísticos (valores extremos, média, histogramas) e os modelos de continuidade espacial de impedância acústica (imposta pelos respetivos variogramas de cada zona dos ensaios) durante as simulações sequenciais de cada ensaio. O facto de uma destas condições não se verificar (ou as variações serem muito significativas) pode levar a uma interpretação e caracterização da zona de reservatório longe da realidade.

Devido à complexidade e heterogeneidade do modelo original de IA, é extremamente importante a reprodução, nos modelos invertidos, das variações desta área de interesse, a pequena e grande escala. Assim sendo, apresentam-se as secções verticais (Figura 38) dos melhores modelos de cada ensaio de modo a facilitar a análise e visualização do comportamento espacial de IA ao longo do interior de cada modelo sintético.





**Figura 37:** Representação do modelo original de impedância acústica (topo) e dos melhores modelos de IA dos seis ensaios GSI.

Numa primeira análise das representações dos modelos (Figura 37) e das respetivas secções verticais (Figura 38), observam-se algumas diferenças na distribuição espacial dos valores da propriedade em estudo, dependendo dos critérios de zonalidade aplicados em cada ensaio. Em detalhe, verificou-se que os modelos dos ensaios 1 e 2 são os que apresentam maiores discrepâncias, comparativamente com o modelo original de IA. Os modelos dos restantes ensaios diferenciam-se mais na zona do reservatório (valores mais baixos de IA). O modelo do ensaio 4, apesar de apresentar uma aproximação

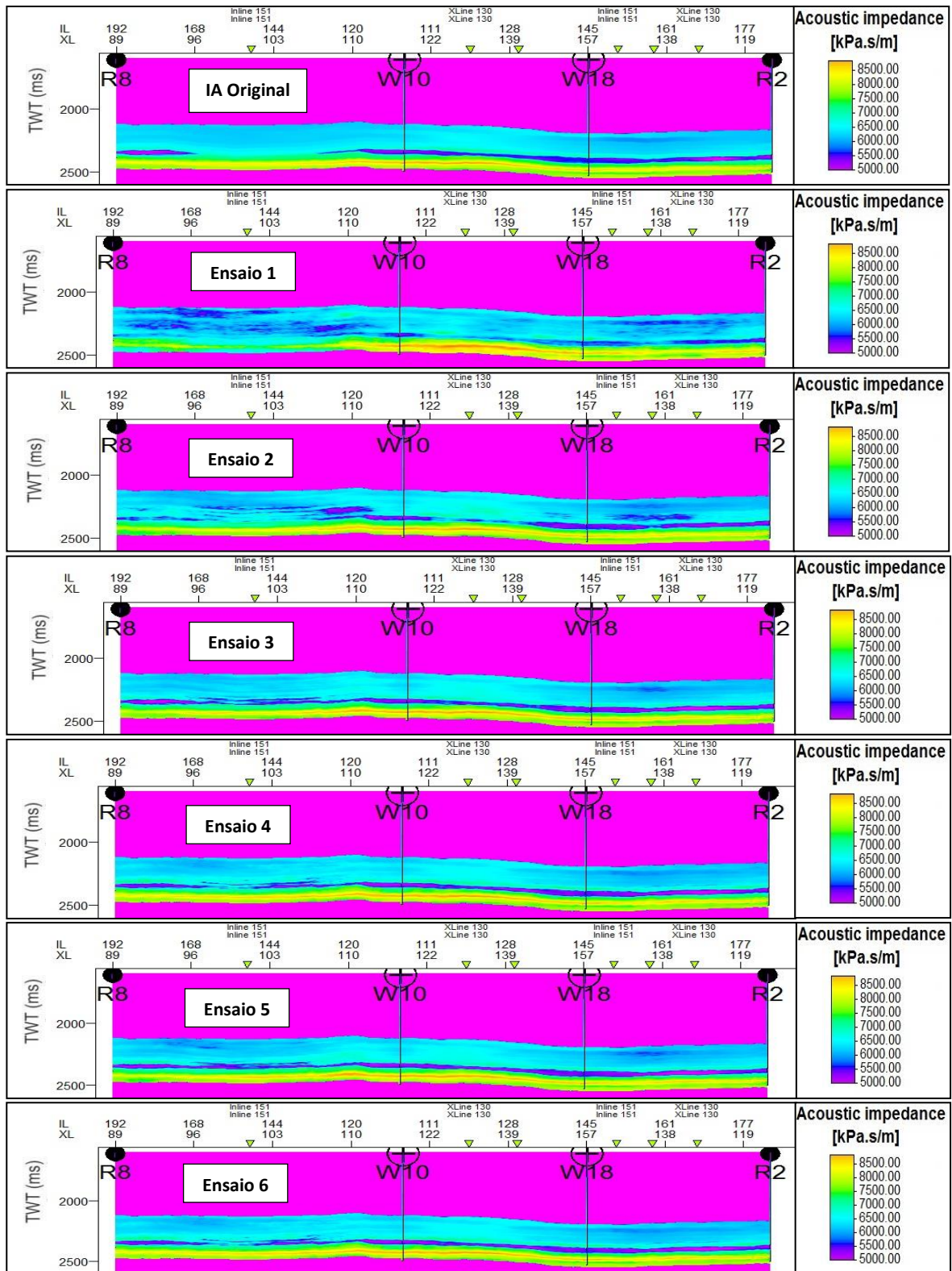


relativamente boa da zona de reservatório, a zona de valores de média impedância (parte superior) ainda apresenta valores baixos de IA e a camada da área inferior ao reservatório encontra-se parcialmente representada. Isto deve-se ao facto de se ter considerado ambas as distribuições dos valores dos poços na mesma zona (segundo o critério de zonalidade aplicado a este ensaio), levando a uma razoável aproximação global do modelo com o original, à exceção da zona de interesse (reservatório). Nos ensaios 2 e 3 é interessante, e ao mesmo tempo lógico, que a zona de baixas impedâncias acústicas (zona 2 de ambos), visualmente apresente diferentes aspetos, uma vez que a divisão da zona de reservatório e respetiva distribuição espacial são distintas nos dois ensaios, ao contrário das zonas de altas impedâncias (zona 3) e de médias impedâncias (zona 1) que se assemelham, visto apresentarem zonas com distribuições espaciais locais condicionantes muito similares.

Através da interpretação visual dos modelos obtidos, verifica-se que os melhores ensaios GSI foram os ensaios 3, 5 e 6. Quanto à geometria da zona do reservatório, as aproximações espaciais dos ensaios referidos são bem melhores que as dos restantes ensaios (à exceção do ensaio 4, ver Figura 38), no entanto, ainda existe alguma incerteza espacial nas localizações mais distantes dos poços, ao longo destas áreas com elevada porosidade (reservatório).

Para o caso do ensaio 1, em que é considerada uma zonalidade global, durante o processo de inversão sísmica, considerando o modelo da melhor realização, apresenta uma elevada incerteza espacial distribuída por todo o modelo, atribuindo, por exemplo, valores baixos de impedâncias a zonas, que na verdade, apresentam exatamente o oposto no modelo original de IA.

Atendendo às áreas adjacentes aos quatro poços representadas nas secções verticais sintéticas da Figura 38, verifica-se que as localizações entre os poços R8 e W10 apresentam a maior discrepância de valores de IA, comparativamente com a seção do modelo original de IA. A seção do ensaio 1 é a menos representativa da zona de reservatório, nem chegando a ser perceptível a geometria desta área, ao contrário do ensaio 2 que, apesar de uma fraca aproximação também, a zona junto do poço W10 ainda é parcialmente representada. Tendo em conta que os últimos ensaios referidos foram os que obtiveram aproximações menos representativas destas áreas, ao contrário dos ensaios 4 e 6 que conseguiram reproduzir os valores condicionantes nas suas localizações.

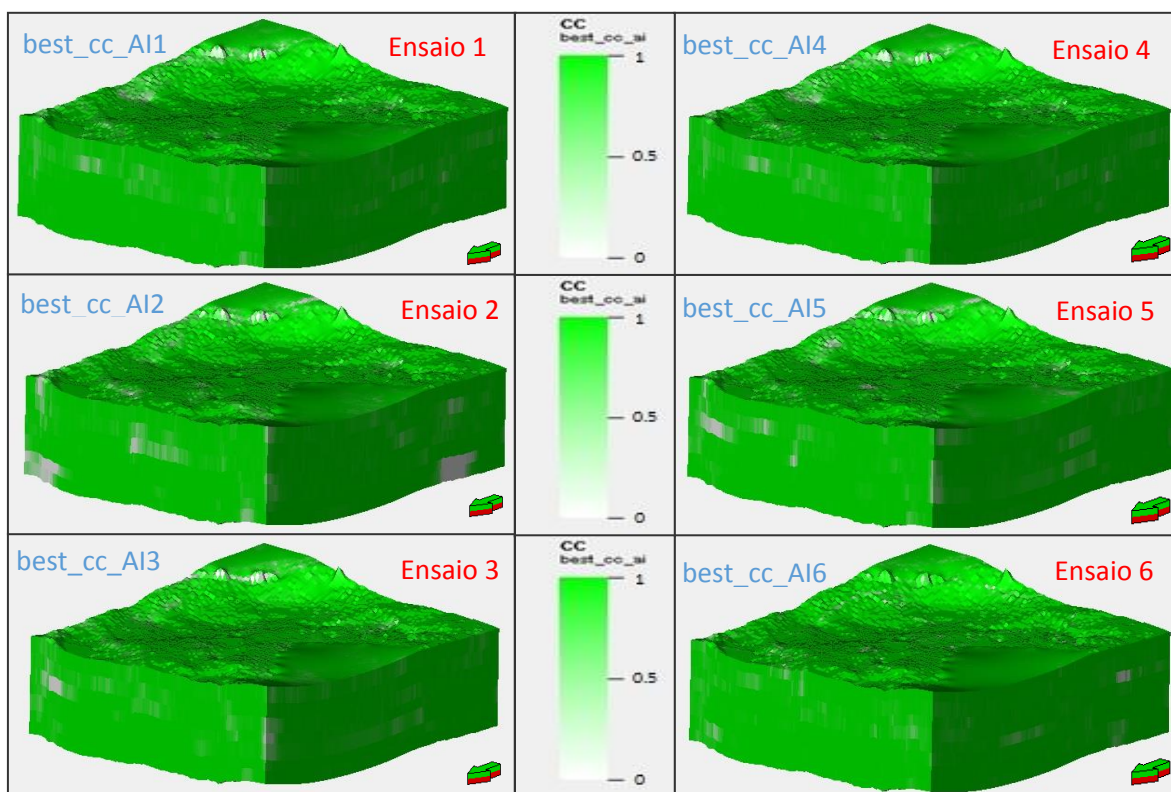


**Figura 38:** Representação da seção vertical do modelo original de IA e das seções verticais dos melhores modelos sintéticos dos ensaios GSI (ver Figura 22 para localização da seção vertical).

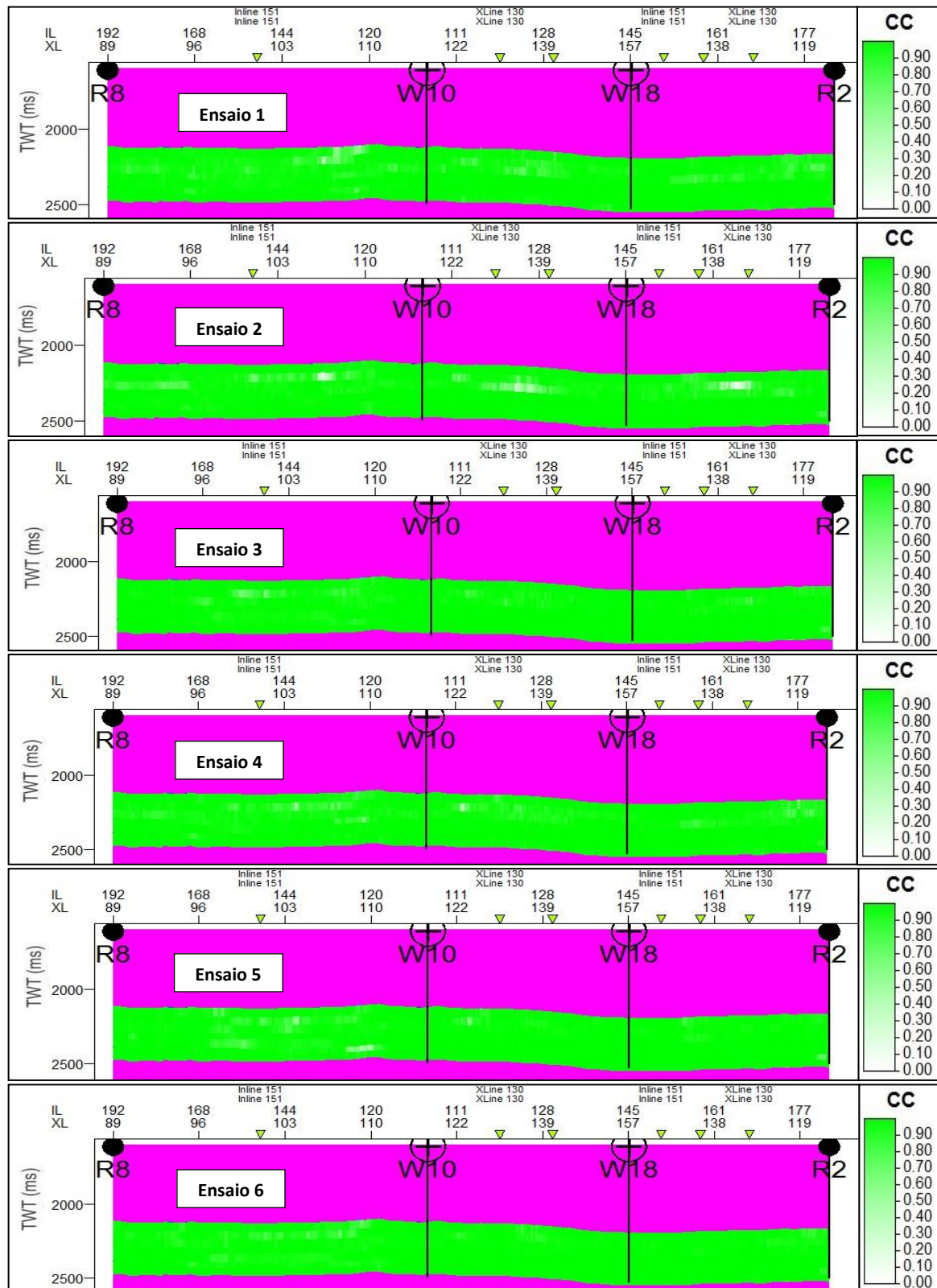
Uma especial atenção para os ensaios 3 e 5 que apresentaram uma aproximação razoável, no entanto o processo estocástico iterativo simulou valores de baixa impedância em localizações onde não existe reservatório, dando uma percepção errada da continuidade deste ao longo da seção vertical entre os poços R8 W10. Nos outros dois intervalos entre poços (W10 – W18 e W18 – R2), todas as seções verticais dos ensaios estão bem representadas, em relação ao modelo original de IA, à exceção do ensaio 2 e essencialmente do ensaio 1, em que a zona de reservatório neste intervalo entre os poços W10 – W18 é praticamente inexistente.

#### 4.3.2 Volumes de Correlação Local entre sísmica sintética e original

A interpretação dos volumes de correlação local, resultantes da comparação entre os volumes de sísmica sintética e sísmica real, permitem aceder à convergência local da metodologia de inversão sísmica. Permitem também identificar as áreas locais onde a sísmica invertida não converge, permanecendo com baixos valores de coeficientes de correlação local. Em conjuntos de dados reais, estas áreas correspondem normalmente a zonas onde a *wavelet* estimada não é representativa dos dados sísmicos observados ou zonas de baixa razão sinal-ruído (Azevedo, 2013).



**Figura 39:** Representação dos volumes de correlação local entre a sísmica original e as sísmicas sintéticas dos seis ensaios GSI.



**Figura 40:** Representação das seções verticais dos volumes de correlação local entre a sísmica original e as sísmicas sintéticas dos seis ensaios GSI (ver Figura 22 para localização da seção vertical).



Dos volumes de correlação (Figura 39) e respetivas seções verticais (Figura 40), constata-se que todos os ensaios, maioritariamente, obtiveram coeficientes de correlação locais entre o intervalo de valores de 0,5 – 1. Porém, o ensaio 2 obteve algumas áreas em que o coeficiente de correlação local, entre a sísmica sintética e original, foi inferior a 0,5. Verifica-se também que junto aos poços representados nas seções verticais, a sísmica foi bem invertida e consequentemente obteve coeficientes de correlação locais com valores próximos de 1.

#### 4.3.3 Sísmica Sintética de Reflexão Post-Stack

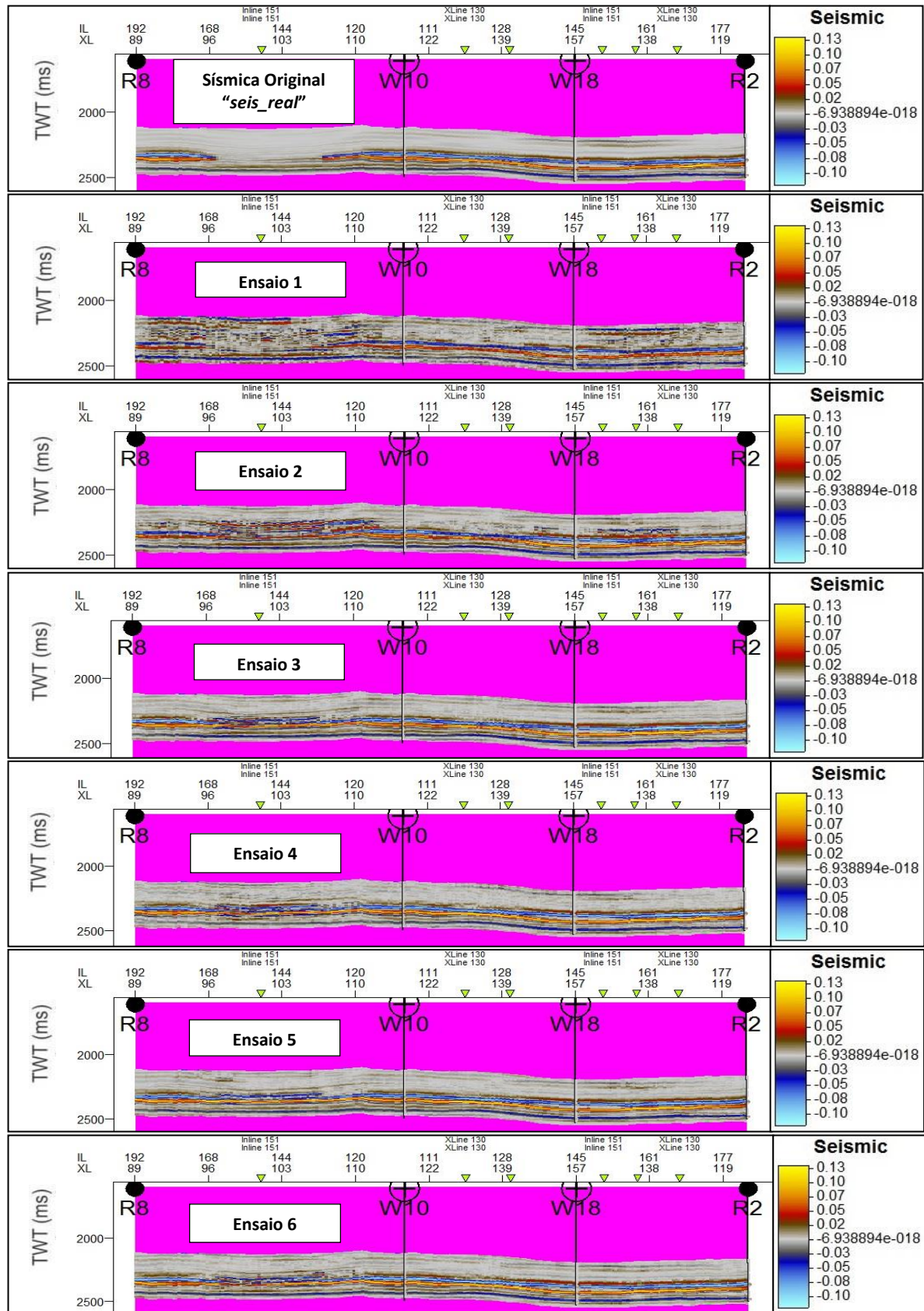
No sub-capítulo anterior fez-se a interpretação dos volumes de correlação local entre os cubos sísmicos, ao longo das seções verticais. De seguida apresentam-se as seções da sísmica de reflexão *post-stack* sintética (Figura 41) geradas a partir dos modelos apresentados na Figura 38.

Para uma melhor comparação das sísmicas geradas, observaram-se também as seções verticais da Figura 40, de forma a correlacionar as localizações que apresentam valores de coeficientes de correlação mais baixos, com as respetivas onde a sísmica invertida não converge.

Tal como se verificou nas seções dos modelos sintéticos de IA (Figura 38), a zona de reservatório entre os poços R8 – W10 não apresenta uma geometria contínua, o mesmo se sucede com o respetivo refletor na sísmica original. No entanto, em qualquer dos seis ensaios realizados, a sísmica sintética assume a continuidade deste refletor, essencialmente nos ensaios 1 e 2 (em que a sísmica invertida não é muito representativa da sísmica original, para toda a seção vertical).

Relativamente ao refletor junto à base dos modelos, este encontra-se razoavelmente bem representado em qualquer dos seis ensaios, ao longo de todas as seções sísmicas sintéticas, embora nos ensaios 1 e 2 seja um pouco menos perceptível devido à fraca qualidade da sísmica gerada.

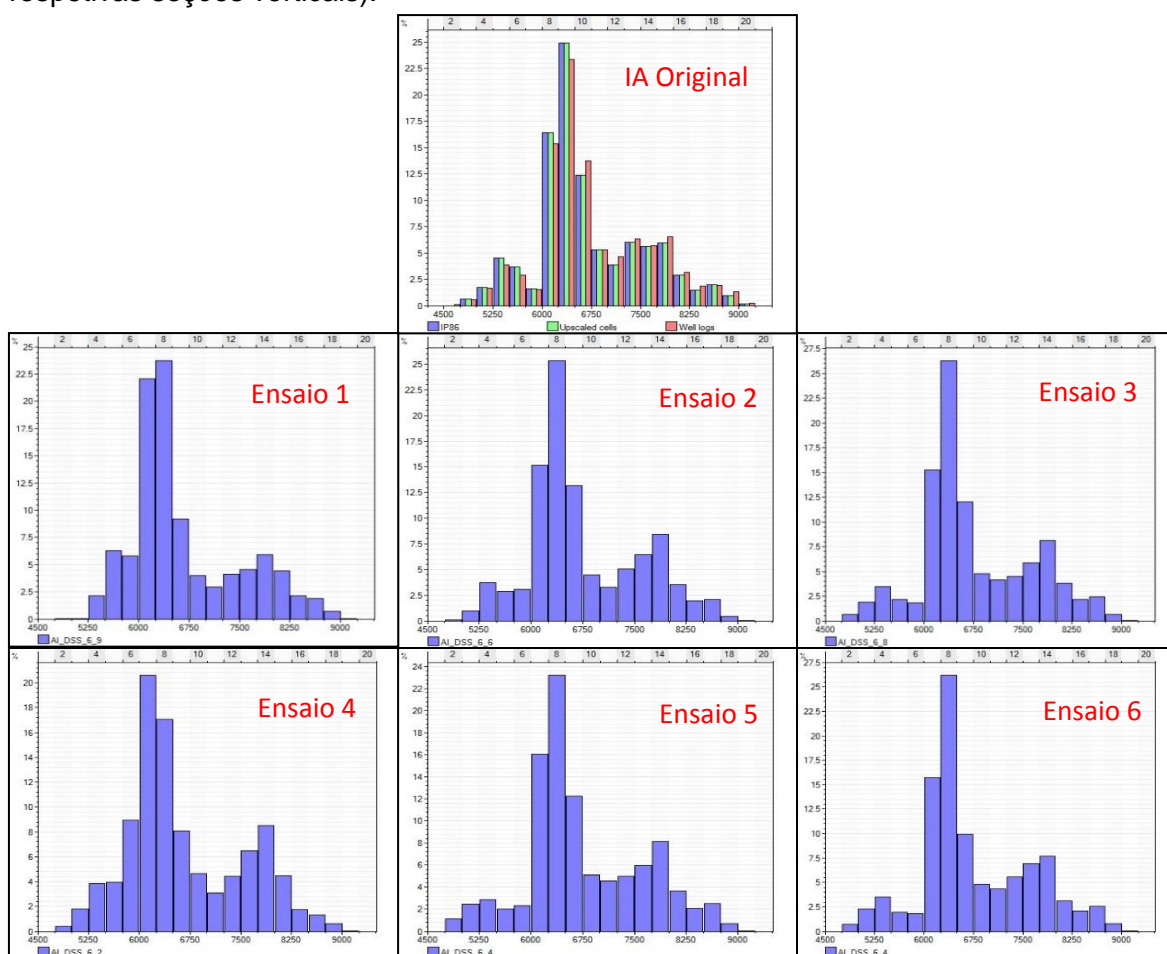
As localizações em que a discrepância entre sísmicas sintéticas e original é menor, encontram-se entre os poços W10 – W18, onde mesmo nos ensaios 1 e 2, a sísmica está com uma boa aproximação com a original desde o topo até à base das respetivas seções verticais. Em contrapartida, as localizações com a maior discrepância, encontram-se entre os poços R8 – W10, devido à perceção errónea da continuidade da área de reservatório ao longo desta zona das seções, como já referido anteriormente.



**Figura 41:** Representação da seção vertical da sísmica *post-stack* original e das seções verticais das sísmicas sintéticas dos seis ensaios GSI (ver Figura 22 para localização da seção vertical).

### 4.3.4 Histogramas dos Modelos Sintéticos

Uma vez que os ensaios 3, 5 e 6 produziram os modelos sintéticos mais aproximados do modelo original de IA, os respectivos histogramas apresentaram também distribuições de valores muito semelhantes à do histograma original (Figura 42). Os ensaios 1 e 4 foram os que apresentaram discrepâncias mais significativas (essencialmente o ensaio 1) relativamente às classes de valores médios de IA (classes adjacentes aos 6000 kPa.s/m) que apresentaram maiores percentagens de valores, em contraste com as classes de valores baixos de IA que apresentaram percentagens muito baixas e, por vezes, nulas. O ensaio 2, que não foi de longe o melhor ensaio GSI, apresenta distribuições de valores de IA próximas do histograma original (de um modo geral). No entanto e devido ao critério de zonalidade aplicado, estes valores sintéticos de IA não se encontram, frequentemente, nas suas localizações originais; daí ser extremamente a interpretação univariada juntamente com os restantes resultados obtidos (nomeadamente os modelos sintéticos e respetivas seções verticais).



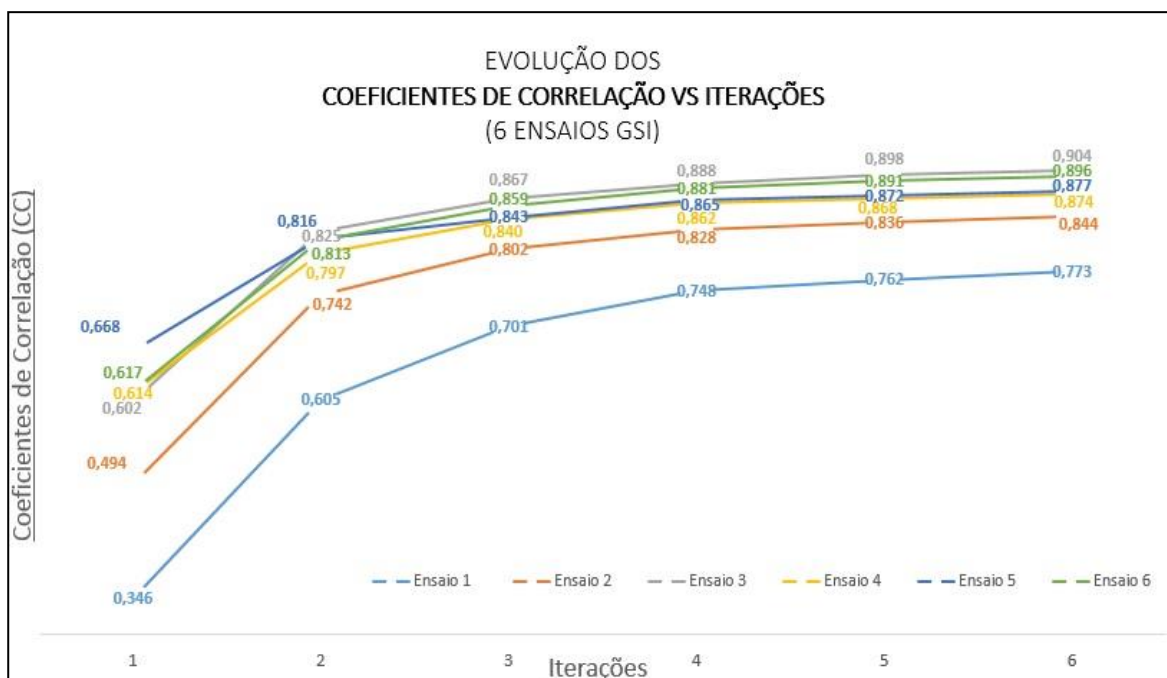
**Figura 42:** Representação do histograma original de IA e dos histogramas dos melhores modelos sintéticos de IA dos ensaios GSI.

#### 4.2.5 Evolução dos Coeficientes de Correlação Global entre Sísmica Original e Sísmicas Sintéticas

Após a apresentação e interpretação dos melhores resultados obtidos para cada ensaio, relativamente à metodologia GSI, avaliou-se também a evolução dos coeficientes de correlação global entre as sísmicas dos seis ensaios ao longo do processo de inversão sísmica (Figura 43).

Como foi referido e comparado anteriormente, os melhores ensaios foram os ensaios 3 e 6 que apresentaram valores de coeficientes de correlação global mais elevados. Por sua vez, os ensaios que apresentaram resultados menos aproximados com os dados originais foram os ensaios 1 e 2 (essencialmente o ensaio 1). O ensaio 5, que até apresentou as melhores correlações globais durante as duas primeiras iterações, acabou por ir estabilizando e obter valores de coeficientes de correlação muito semelhantes aos do ensaio 4, no entanto inferiores aos dos ensaios 3 e 6.

A representação gráfica da evolução dos valores de CC é referente a uma corrida para os vários ensaios realizados com a GSI.



**Figura 43:** Representação da evolução dos coeficientes de correlação global entre sísmica original e sísmicas sintéticas dos seis ensaios GSI.



## 4.4 Ensaios com Inversão Elástica Global (GEI)

Neste subcapítulo são apresentados os resultados obtidos através da utilização do método geoestatístico GEI (*Global Elastic Inversion*), após um processo iterativo de inversão constituído por 6 iterações. A cada iteração, um conjunto de 32 modelos de impedância acústica e elástica foram sequencialmente simulados e co-simulados, respetivamente, recorrendo ao algoritmo de simulação sequencial direta (SSD) e ao de co-simulação de distribuição conjunta de probabilidades.

### 4.4.1 Modelos Sintéticos de Impedâncias Acústica e Elástica

Durante os processos de inversão sísmica foram obtidos conjuntos de 32 modelos de IA e de IE, a cada nova iteração; no entanto neste subcapítulo são apresentados apenas os melhores modelos de IA e IE de cada ensaio, relativos à última iteração (6ª iteração: Figura 44 e Figura 45).

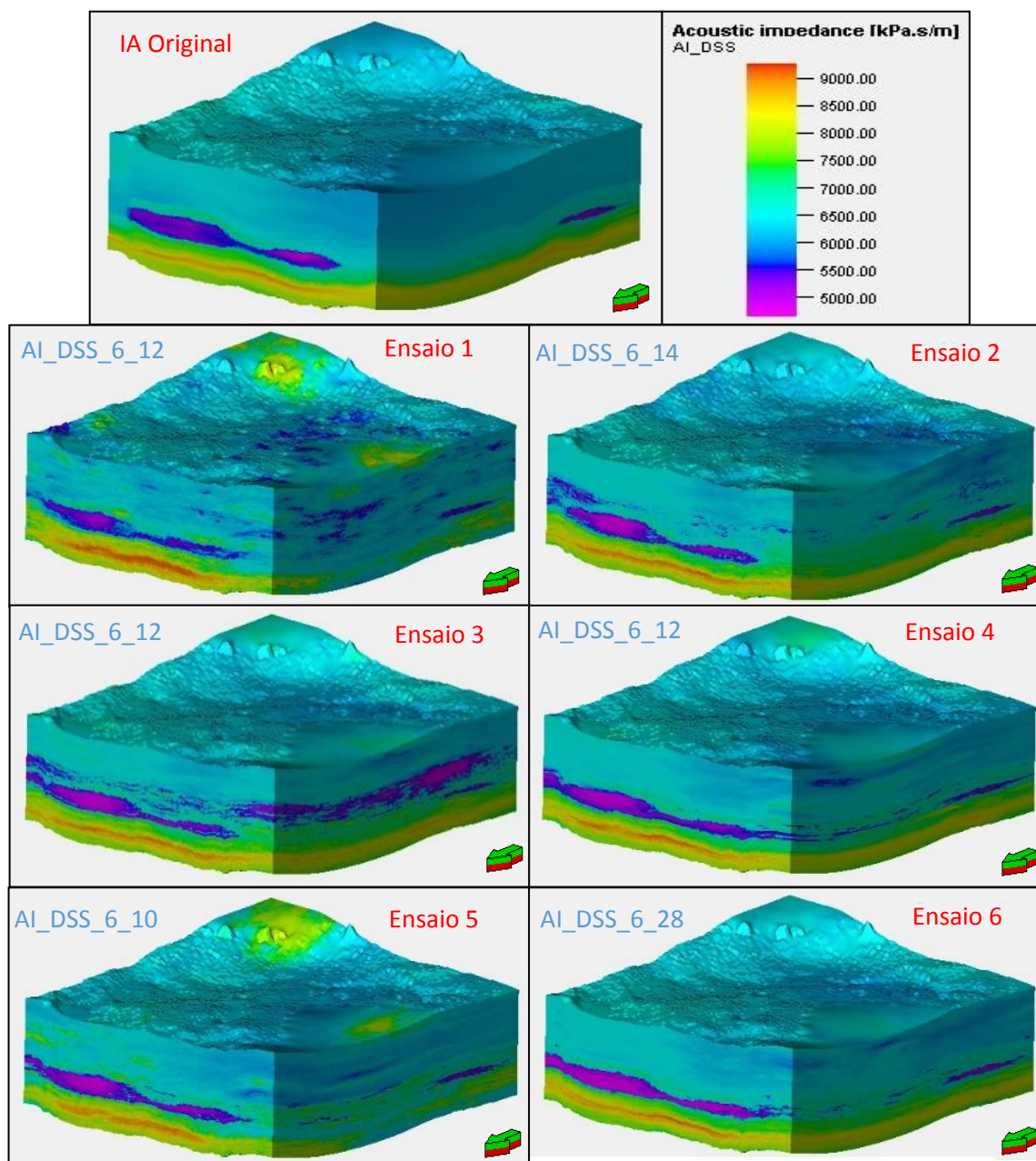
Todos os modelos sintéticos (IA e IE), gerados durante todo o processo iterativo de inversão sísmica, deverão ser capazes de reproduzir e assegurar: os valores das propriedades dos dados condicionantes e as suas localizações (especialmente), os principais elementos estatísticos (valores extremos, média, histogramas) e os modelos de continuidade espacial de impedâncias (IA e IE), imposta pelos respetivos variogramas de cada zona dos ensaios (Anexo II).

Para uma melhor interpretação das variações detalhadas, a pequena e grande escala, do interior dos modelos foram também realizadas secções verticais relativas aos melhores modelos de IA e IE de cada ensaio, ilustradas na Figura 45 e Figura 47, respetivamente.

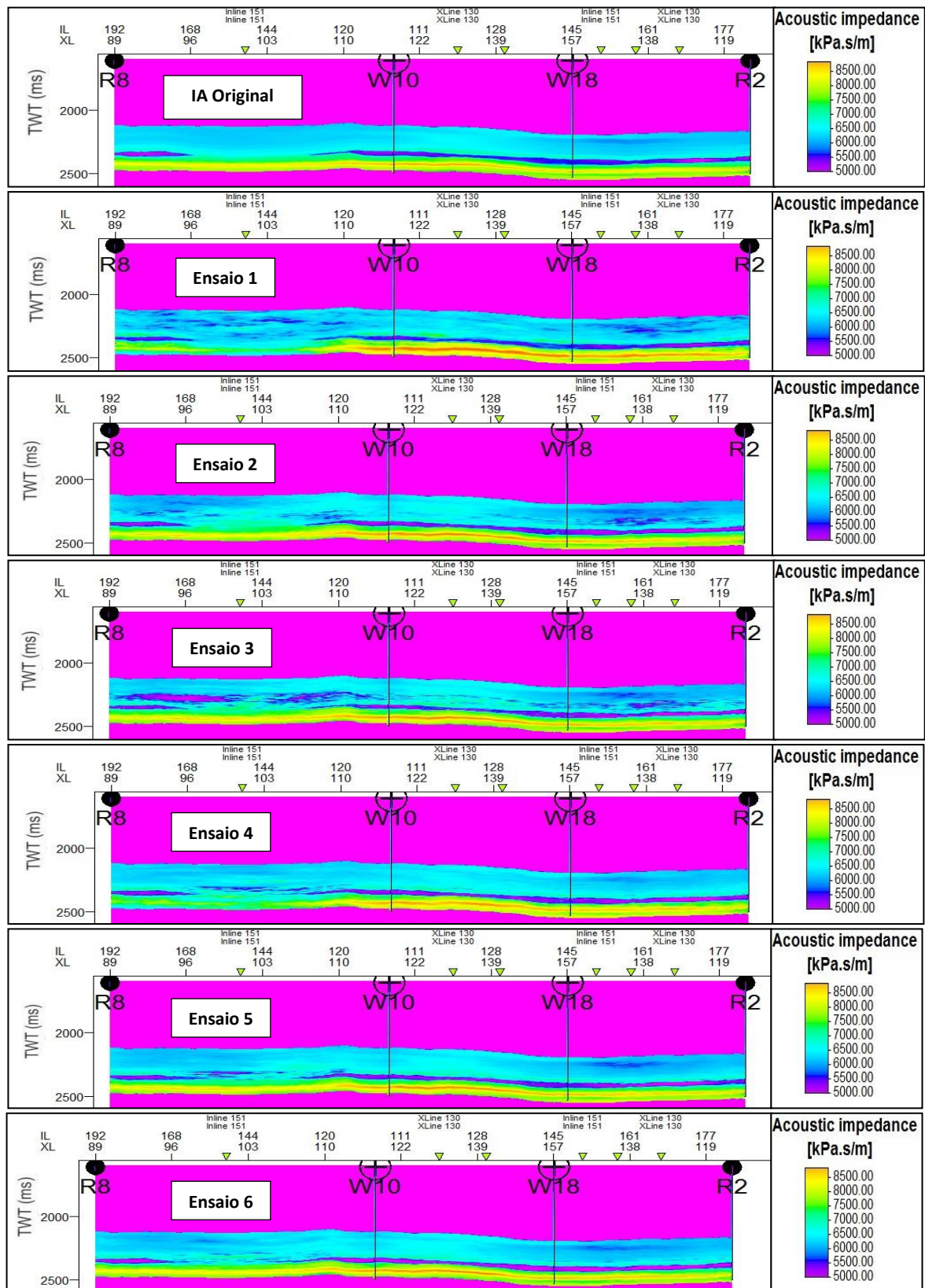
Relativamente às representações dos modelos (Figura 44) e das respetivas secções verticais (Figura 45) de IA, verifica-se que existem algumas discrepâncias entre si mas também em relação ao modelo original. Alguns modelos sintéticos apresentam valores simulados de IA em localizações que não correspondem ao modelo original, como o caso dos ensaios 1 e 5 com valores altos de IA no topo dos modelos, ou o ensaio 3 que apresenta valores baixos de IA nas áreas adjacentes ao reservatório, mas já fora desta zona.

De um modo geral, verifica-se que a geometria da zona de reservatório encontra-se bem definida em praticamente todos os modelos sintéticos, bem como a camada representada com valores altos de impedância. A grande discrepância é exatamente na área de

impedâncias médias. Assim, os modelos dos ensaios 2, 4 e 6 podem-se considerar os melhores modelos da metodologia de inversão GEI, devido à boa distribuição espacial dos valores de IA. Por sua vez e pelos mesmos fundamentos, os modelos dos ensaios 1, 3 e 5 foram os que apresentaram uma aproximação mais suave comparativamente com o modelo original de IA.



**Figura 44:** Representação do modelo original de impedância acústica (topo) e dos melhores modelos de IA dos seis ensaios GEI.



**Figura 45:** Representação da seção vertical do modelo original de IA e das seções verticais dos melhores modelos sintéticos dos ensaios GEI (ver Figura 22 para localização da seção vertical)

Atendendo exclusivamente às secções verticais, para uma interpretação mais detalhada, verifica-se que a secção do ensaio 6 é a mais representativa e aproximada à secção original, juntamente com a do ensaio 2, no entanto apresenta alguns valores baixos de IA nas áreas acima da zona do reservatório, nas localizações entre os poços R8 – W10 e W18 – R2. As secções entre os poços W10 – W18 dos vários ensaios encontra-se muito bem representada nos modelos sintéticos; no entanto há que realçar um pormenor em relação ao ensaio 1, onde a camada de altas impedâncias (base da secção vertical) se apresenta exageradamente espessa em comparação com a dos restantes ensaios e com a original.

Relativamente à secção vertical entre os poços R8 – W10, de um modo geral a zona de reservatório encontra-se bem aproximada e definida em qualquer uma das representações dos ensaios. No entanto, nos ensaios 1 e 3, que coincidiram como os ensaios GEI menos aproximados com o original, apresentam um significativo conjunto de valores de baixas impedâncias nas áreas acima do reservatório.

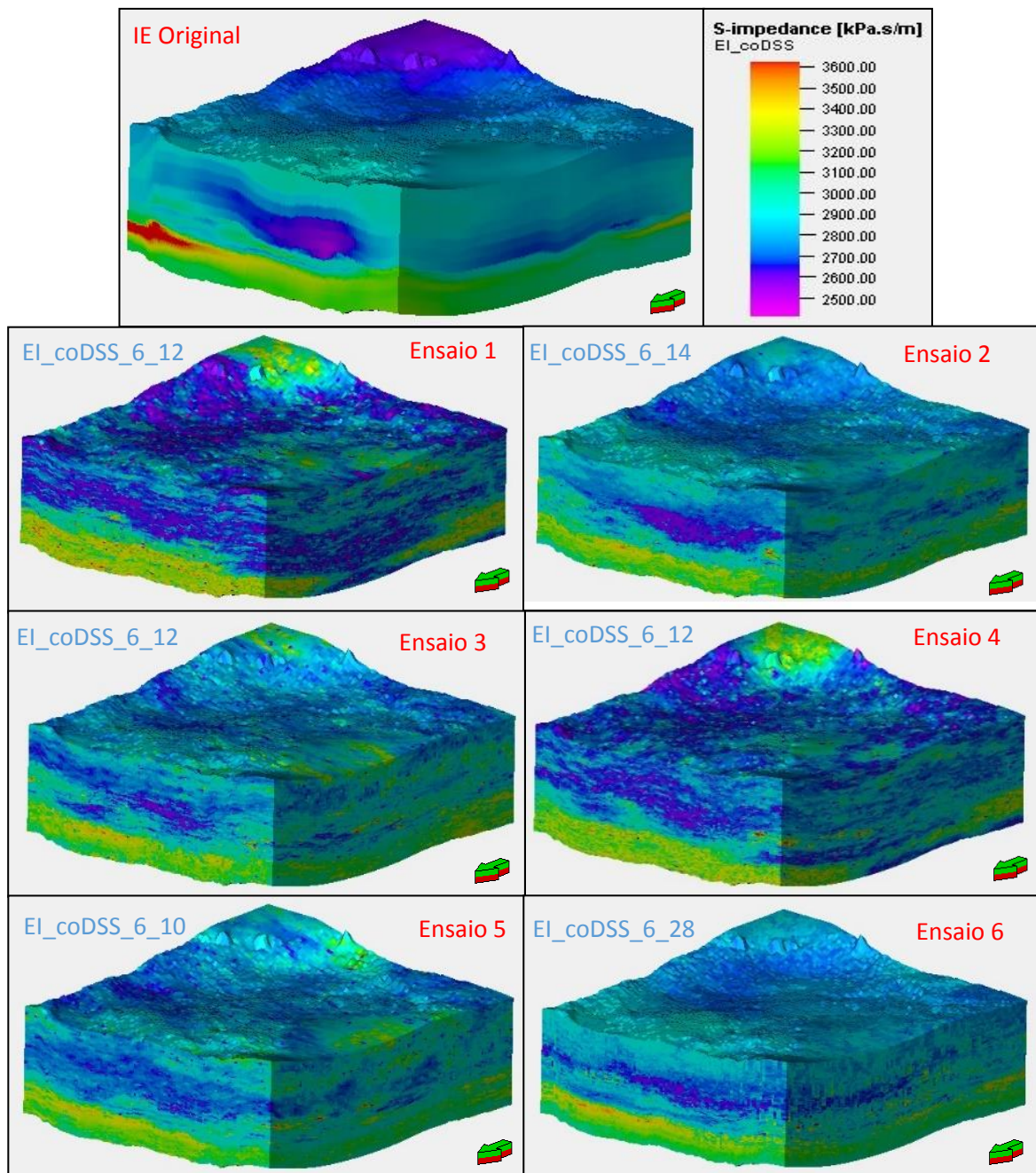
Quanto aos resultados co-simulados de impedância elástica (IE), relativamente às representações dos modelos sintéticos (Figura 46) e das respectivas secções verticais (Figura 47), na generalidade houve uma grande discrepância espacial dos valores de IE em comparação com o modelo original.

Atendendo à visualização e interpretação mais detalhada dos modelos e secções dos seis ensaios, verifica-se que os ensaios 1 e 4 foram os que apresentaram representações menos aproximadas em comparação com o modelo original de IE e com os restantes ensaios. Estes dois ensaios (essencialmente o ensaio 1) apresentam distribuições de valores baixos de IE por todo o modelo, não coincidindo por vezes com as localizações segundo o modelo original, como se pode constatar no interior dos modelos através das secções verticais entre os poços R8 – W10 e W10 – W18.

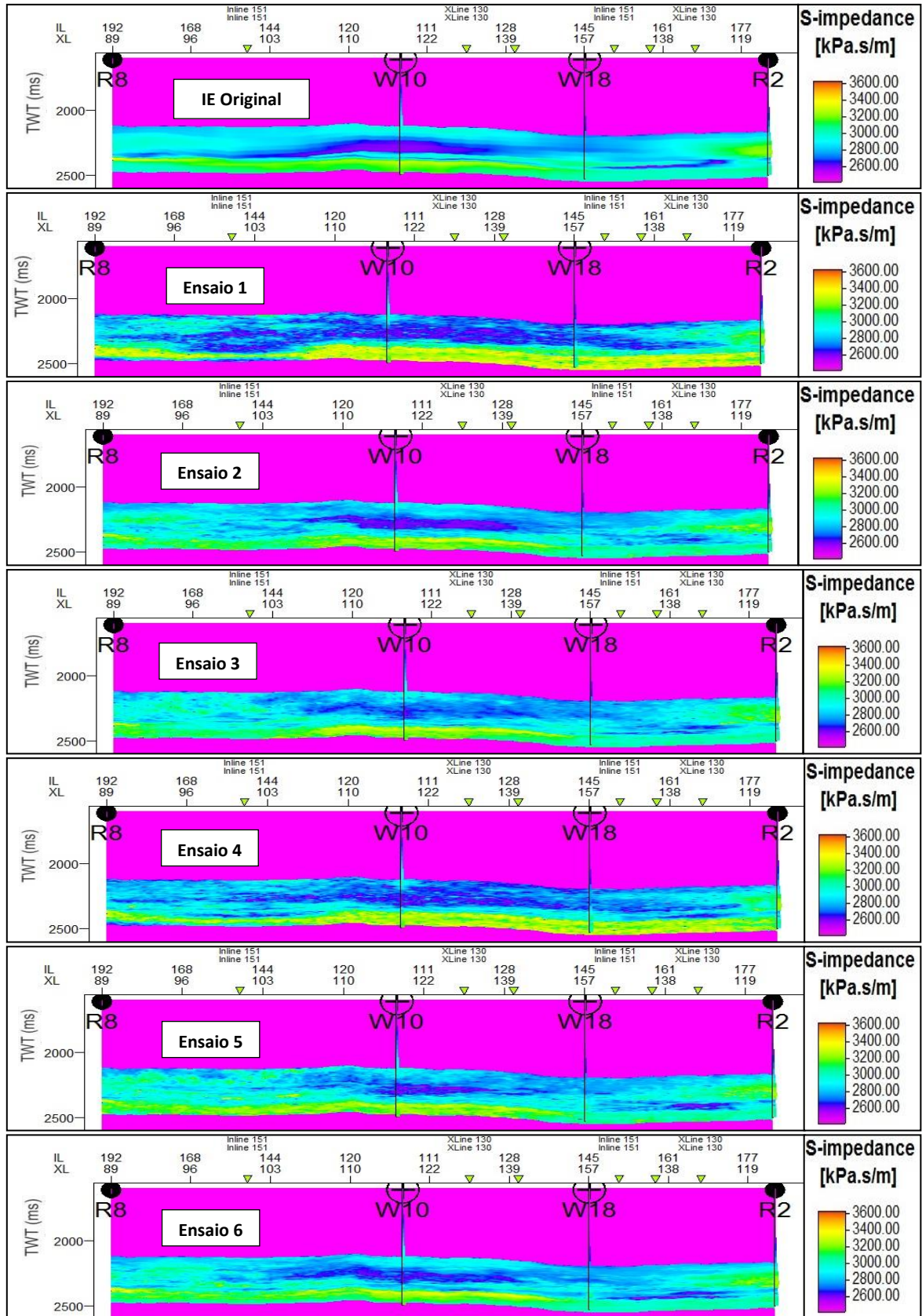
Os modelos dos restantes ensaios apresentam muitas semelhanças entre si, espacialmente; no entanto e mais detalhadamente, as aproximações ainda se apresentam um pouco suaves e longe em comparação com o modelo original de IE. Ainda assim, os ensaios 2 e 6 foram os que apresentaram as melhores representações relativamente ao modelo original, onde a zona de reservatório está bem definida nas secções entre os poços R8 – W10 e W10 – W18, especialmente junto ao poço W10. No entanto entre os poços W18 – R2, os ensaios 5 e 6 representam melhor a zona isolada



de baixas impedâncias elásticas, ao contrário do ensaio 2 (e essencialmente dos ensaios 1, 3 e 4) que não se encontra tão bem definida.



**Figura 46:** Representação do modelo original de impedância elástica (topo) e dos melhores modelos de IE dos seis ensaios GEI.



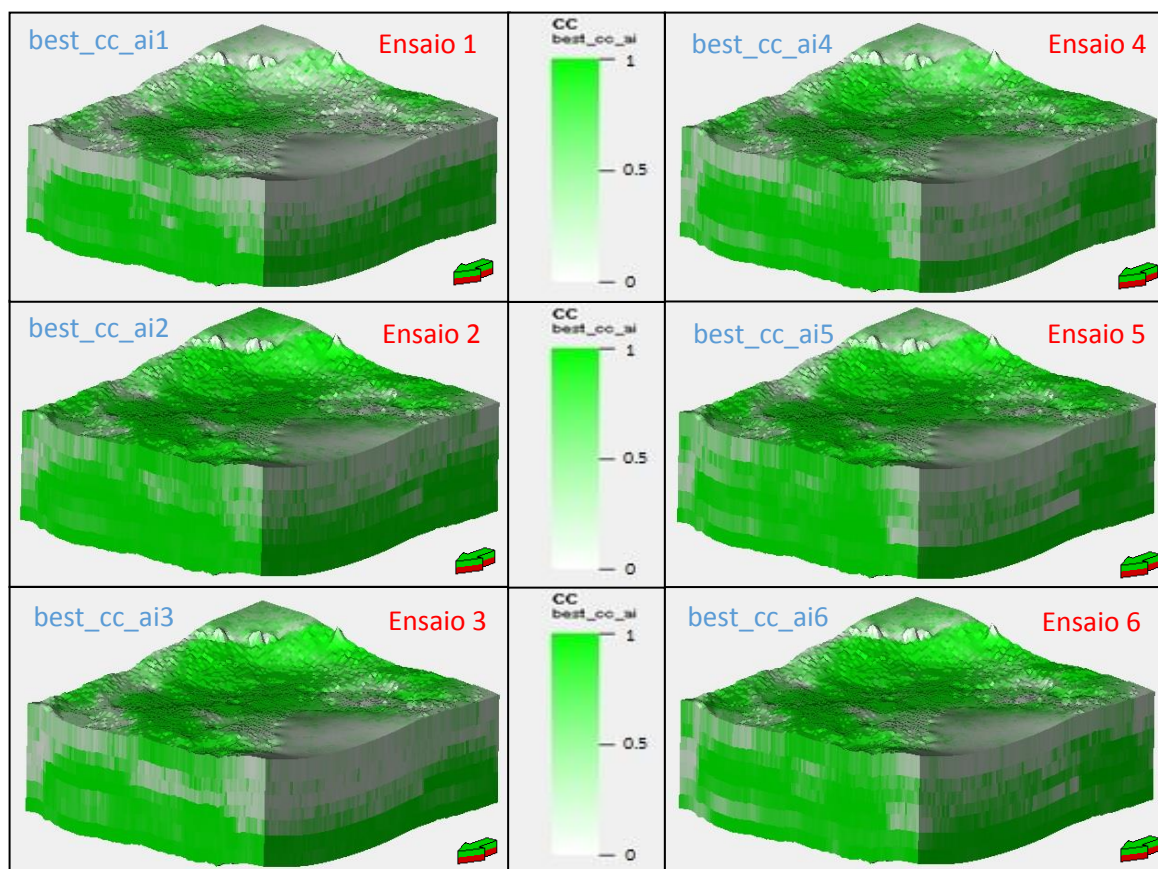
**Figura 47:** Representação da seção vertical do modelo original de IE e das seções verticais dos melhores modelos sintéticos dos ensaios GEI (ver Figura 22 para localização da seção vertical).



#### 4.4.2 Volumes de Correlação Local entre Sísmica Original e Sísmica Sintética

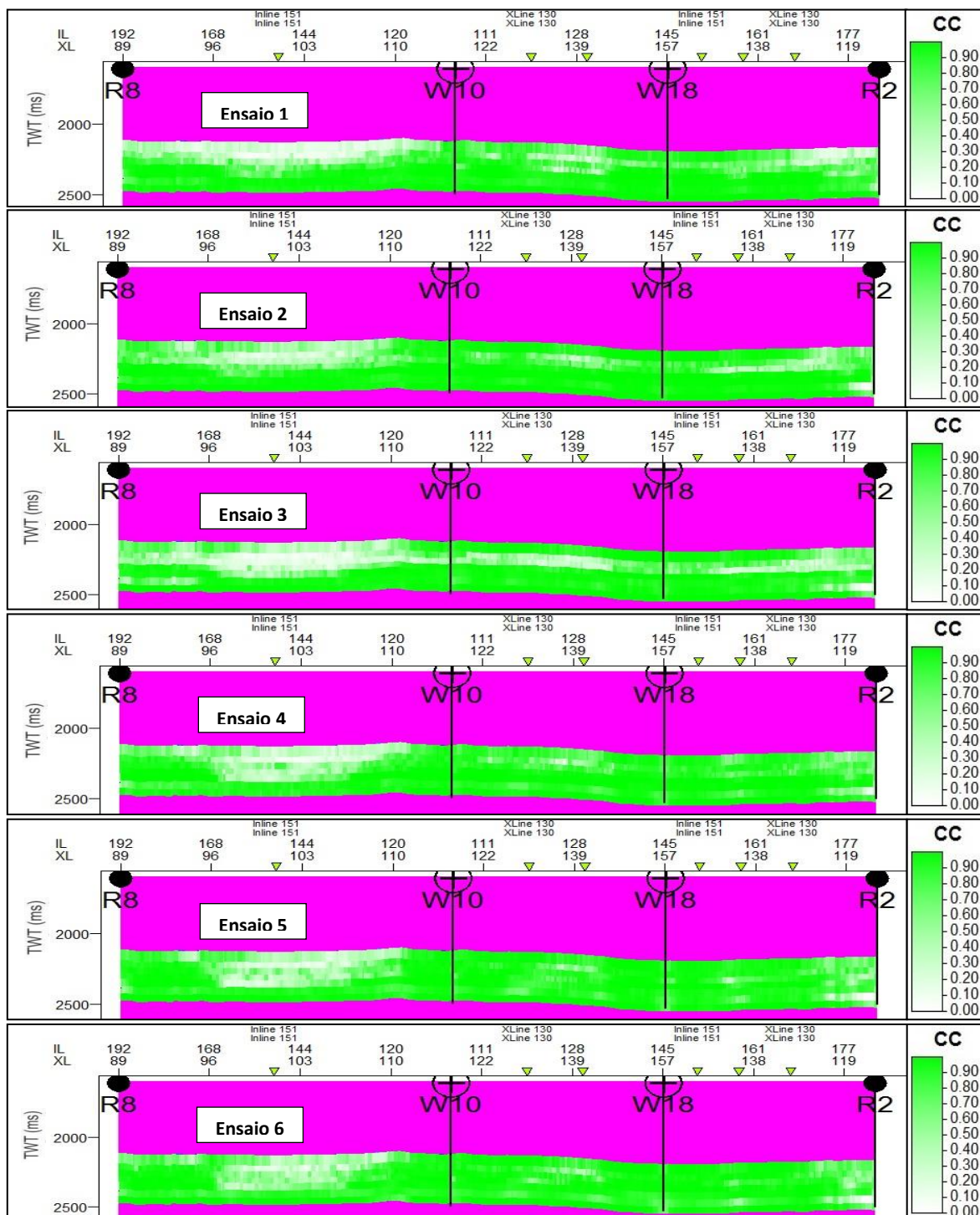
Uma vez apresentados os resultados dos modelos sintéticos de IA e IE, apresentam-se agora os modelos e seções verticais dos volumes de correlação local entre a sísmica sintética e a original. Estes resultados são relativos à simulação e co-simulação dos modelos de IA e IE, respetivamente, apresentados no subcapítulo anterior. Os melhores volumes de correlação local, da 6ª iteração, são apresentados na Figura 48 e na Figura 50 e as respetivas seções verticais na Figura 49 e Figura 51.

Os volumes de correlação local (Figura 48) permitem concluir que existem muitas zonas dos modelos que apresentam grande incerteza espacial, traduzida pelos baixos valores de coeficientes de correlação locais. Estas zonas revelam que a sísmica utilizada não foi bem invertida em certas áreas, durante o processo de inversão. Atendendo às seções verticais (Figura 50), para uma interpretação mais detalhada do interior dos modelos, verifica-se que as localizações, entre os poços R8 – W10, foram as que apresentaram mais áreas com maior incerteza e baixos valores de CC locais.



**Figura 48:** Representação dos volumes de correlação local entre a sísmica original e as sísmicas sintéticas dos seis ensaios GEI, referentes à propriedade de impedância acústica (IA).

Contudo, os ensaios 2 e 6 foram os que, nestas áreas (e em geral), apresentaram menor incerteza e valores de CC locais entre os 0,5 – 1, visto serem também os melhores modelos sintéticos de IA e IE dos ensaios GEI.

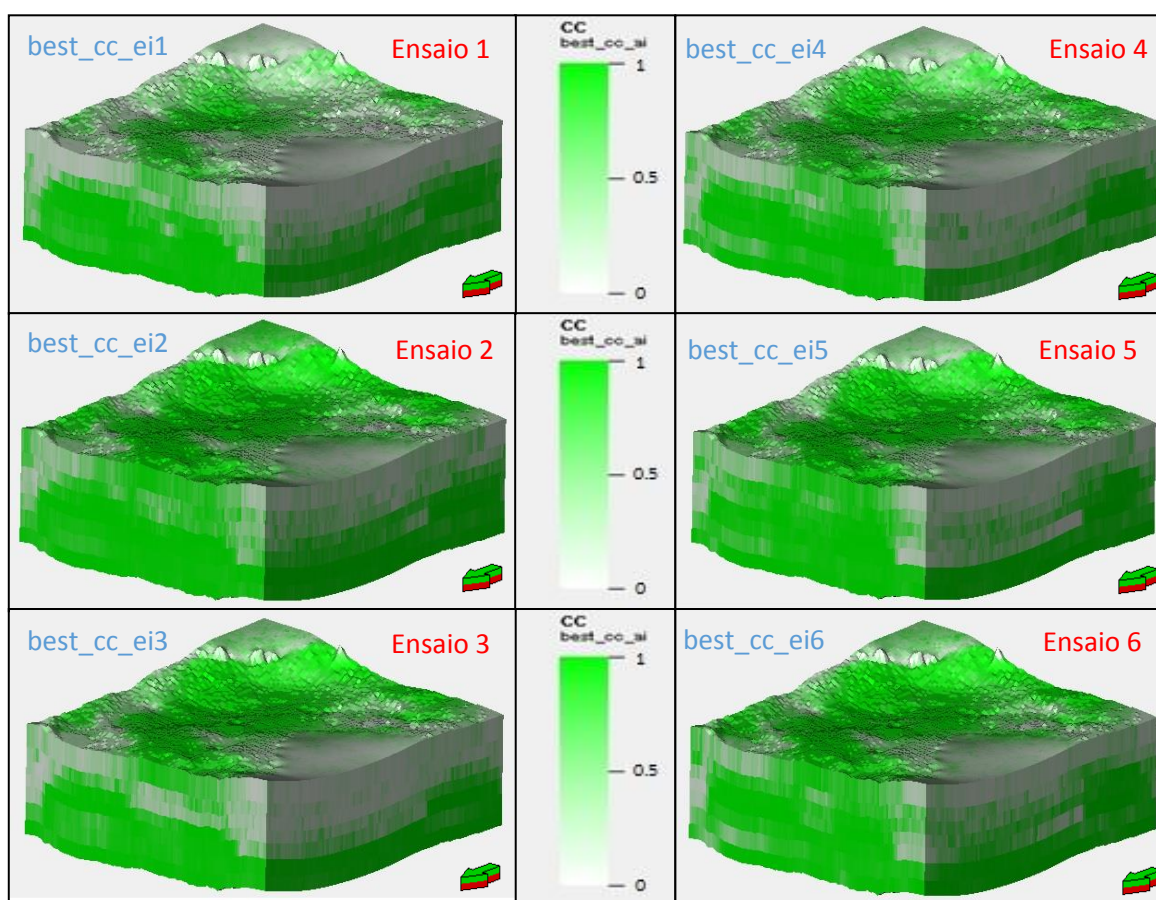


**Figura 49:** Representação das seções verticais dos volumes de correlação local entre a sísmica original e as sísmicas sintéticas dos seis ensaios GEI, referentes à propriedade de impedância acústica (ver Figura 22 para localização da seção vertical).

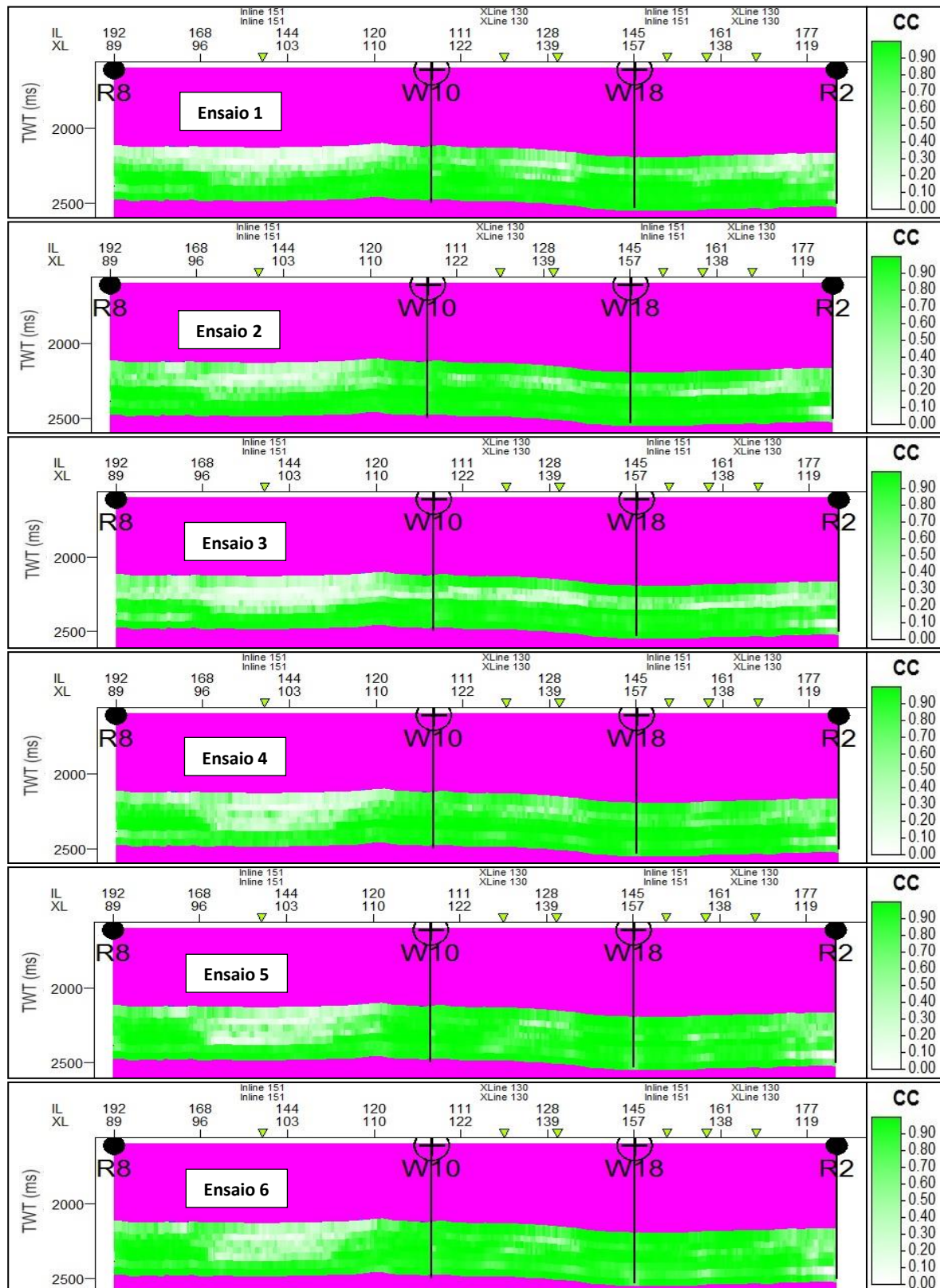


Os modelos (Figura 50) e seções verticais (Figura 51) referentes à co-simulação da propriedade IE apresentam muitas zonas em que a sísmica não convergiu o suficiente em torno da realidade.

Assim e atendendo às seções verticais, verifica-se que as áreas no topo, entre os poços R8 – W10, com valores de CC locais inferiores a 0,5 correspondem a uma parte da extensa área no topo frontal dos volumes de correlação local, apresentando maior incerteza espacial. Nas localizações entre os poços W10 – W18 e W18 – R2, o ensaio 3 é o que apresenta maior número de zonas com valores de CC locais inferiores a 0,5. Como referido anteriormente, a zona com valores baixos de IE entre os poços W18 – R2 (Figura 47) foi melhor representada no ensaio 5 do que no ensaio 2 (que no entanto foi dos melhores ensaios GEI). Transpondo esta informação para as seções verticais dos volumes de correlação local, conclui-se que no ensaio 2, comparativamente com o ensaio 5, nesta mesma zona entre poços apresenta um maior número de zonas com valores de CC locais inferiores a 0,5.



**Figura 50:** Representação dos volumes de correlação local entre a sísmica original e as sísmicas sintéticas dos seis ensaios GEI, referentes à propriedade de impedância elástica (IE).



**Figura 51:** Representação das seções verticais dos volumes de correlação local entre a sísmica original e as sísmicas sintéticas dos seis ensaios GEI, referentes à propriedade de impedância elástica (ver Figura 22 para localização da seção vertical).

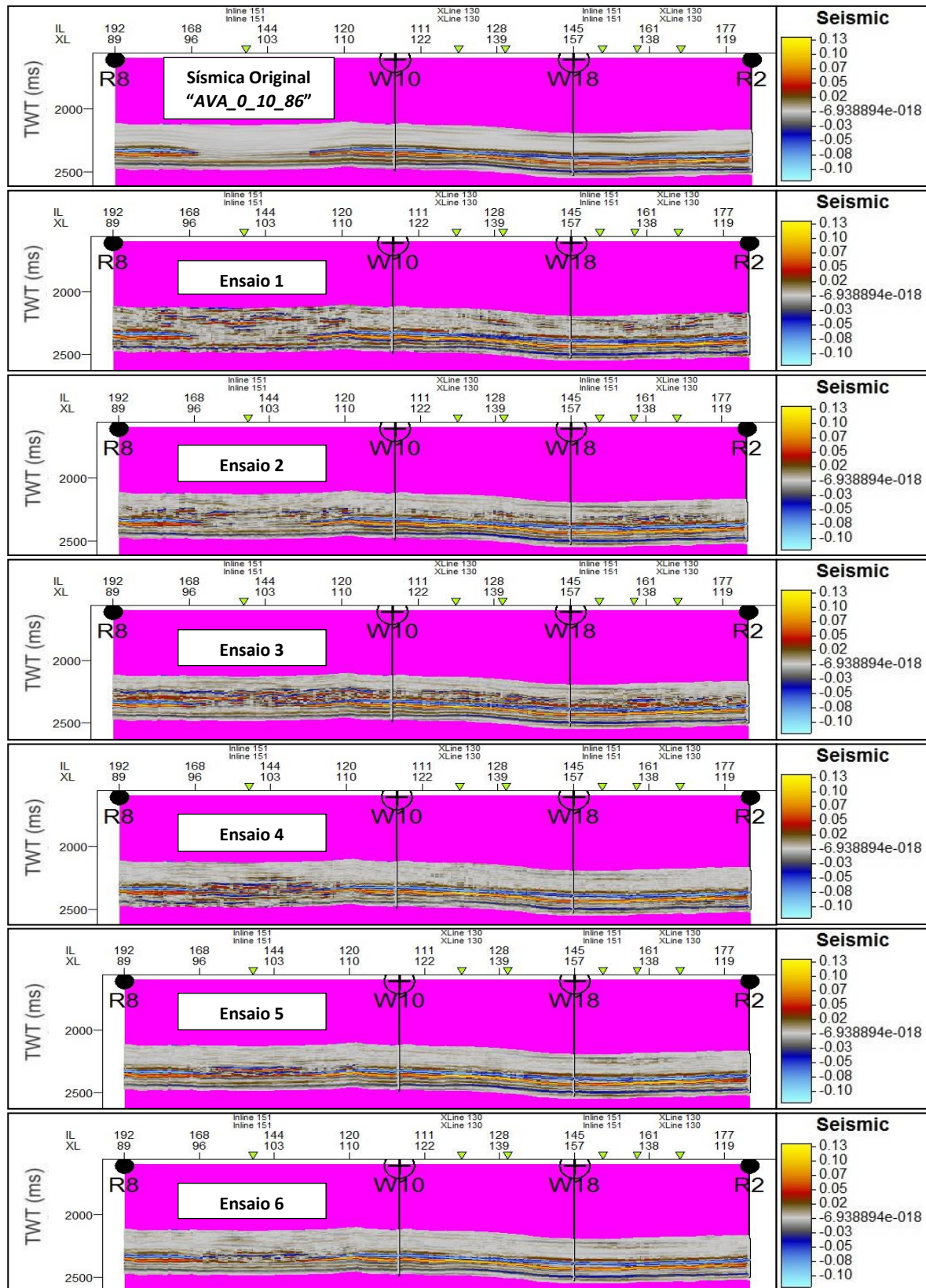
#### 4.4.3 Sísmica Sintética de Reflexão *Partial Post-Stack*

Neste subcapítulo apresentam-se as seções verticais da sísmica de reflexão *partial post-stack* sintética, obtidas durante o processo de inversão GEI, de forma a poder ser comparada entre os diversos ensaios e com sísmica original utilizada.

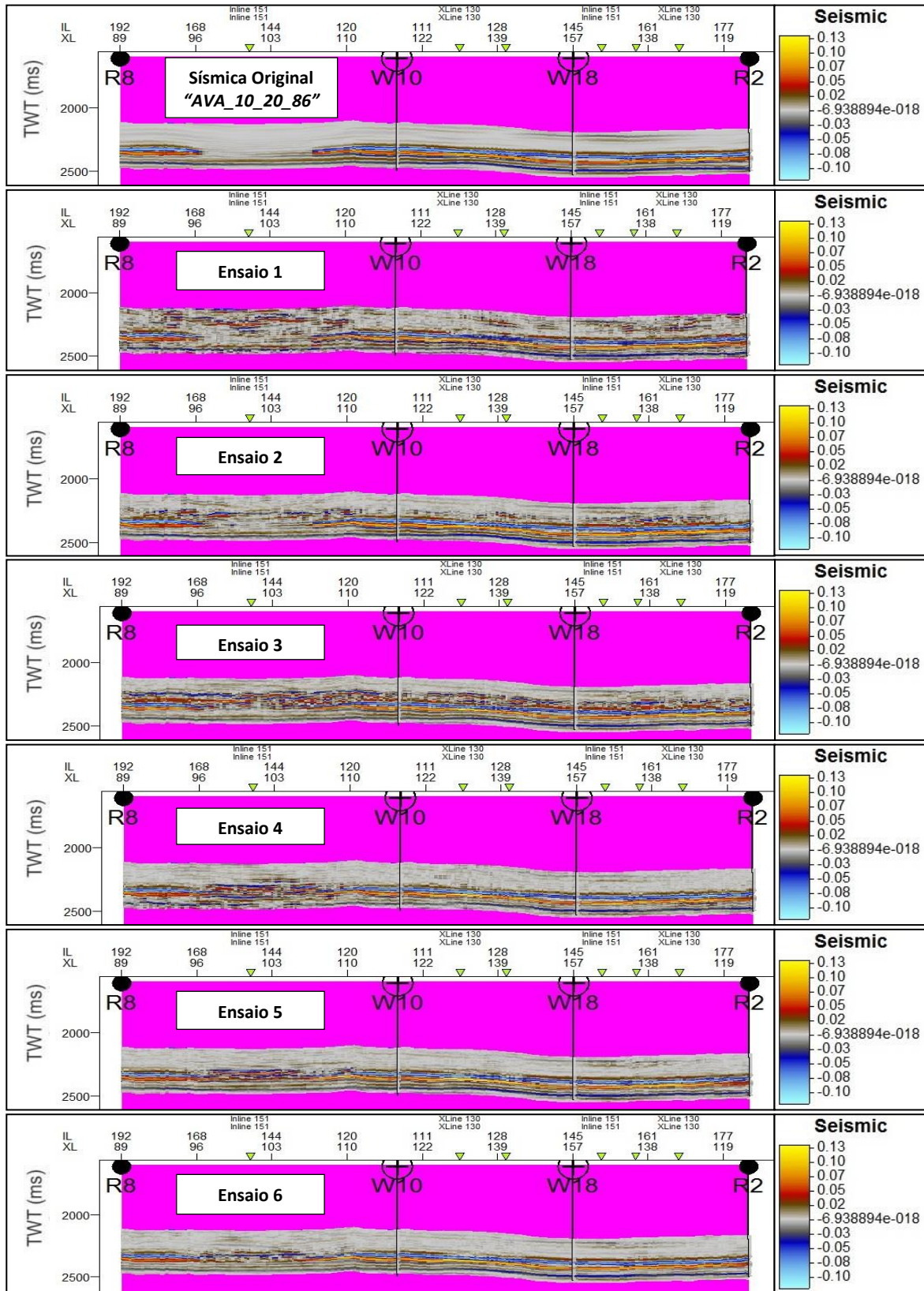
Ao contrário da sísmica *post-stack* utilizada nos ensaios GSI, onde é apresentado a sísmica *fullstack*, nestes nos ensaios GEI a sísmica *partial post-stack* é utilizada em função dos ângulos parciais. As designações de “AVA\_0\_10\_86”, “AVA\_10\_20\_86”, “AVA\_20\_30\_86” e “AVA\_30\_40\_86” correspondem à sísmica dos ângulos parciais 5°, 15°, 25° e 35°, respetivamente. Pela ordem apresentada, os ângulos parciais correspondem a *nearstack* (Figura 52), *near-midstack* (Figura 53), *far-midstack* (Figura 54) e *farstack* (Figura 55), respetivamente. Como as diferenças, entre as sísmicas de cada ângulo parcial, são pormenorizadas e por vezes de difícil diferenciação, apresenta-se uma interpretação conjunta realçando apenas a diferença entre as sísmicas sintéticas dos ensaios e a sísmica original.

Atendendo às seções verticais, verifica-se que os principais contrastes de reflexão, entre valores médios de impedâncias para valores baixos de impedância (zona de reservatório) e entre valores médios e altos de impedâncias (camada na base dos modelos), se encontram representados em todas as sísmicas sintéticas. Contudo, nem todos os ensaios são bem representativos destes refletos, onde os ensaios 2 e 6 foram os que os apresentaram melhor definidos. No ensaio 1, entre os poços R8 – W10, a sísmica sintética não foi bem invertida na zona acima do reservatório, gerando um refletor fictício, o que justifica os valores baixos de CC locais nos volumes de correlação (Figura 49 e Figura 51) e os valores baixos de IA e IE (Figura 45 e Figura 47) nestas localizações que não correspondem com o modelo original. O ensaio 3 foi provavelmente o que a sísmica invertida é a menos representativa da sísmica original, de uma forma geral. Ao longo da seção do ensaio 3 e realçando esta localização entre os poços referidos, o refletor fictício não se encontra acima do reservatório (como no ensaio 1) mas sim na área do reservatório original, dando uma perceção errada da continuidade do reservatório. A mesma situação acontece nos ensaios 4 e 5, no entanto, nas áreas entre os poços W10 – W18 e W18 – R8, as zonas acima do reservatório encontram-se com menos reflexões, aproximando-se mais com o modelo da sísmica original.



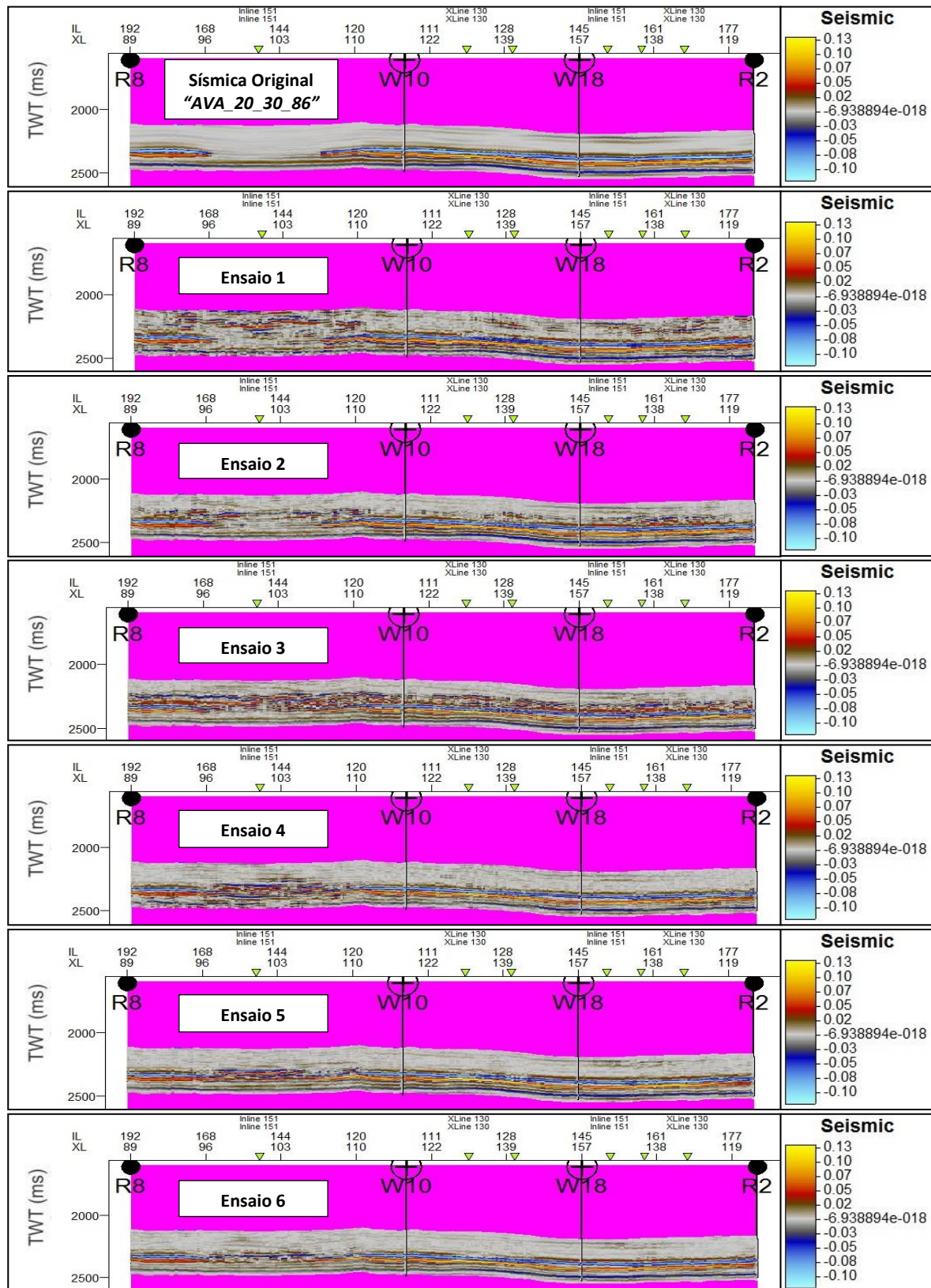


**Figura 52:** Representação da seção vertical da sísmica *partial post-stack* AVA\_0\_10\_86 original e das seções verticais das sísmicas sintéticas dos seis ensaios GEI (ver Figura 22 para localização da seção vertical).

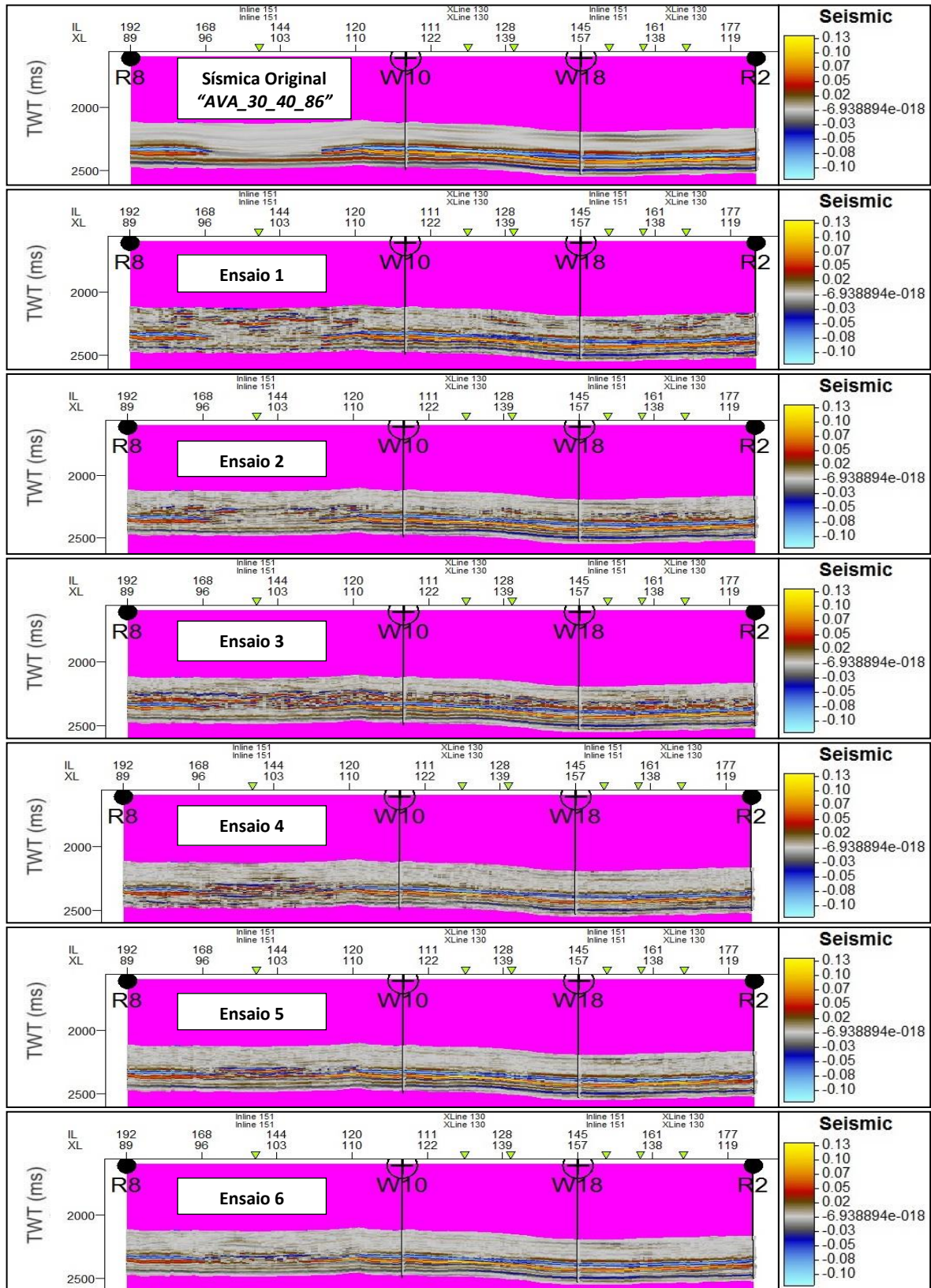


**Figura 53:** Representação da seção vertical da sísmica *partial post-stack* AVA\_10\_20\_86 original e das seções verticais das sísmicas sintéticas dos seis ensaios GEI (ver Figura 22 para localização da seção vertical).





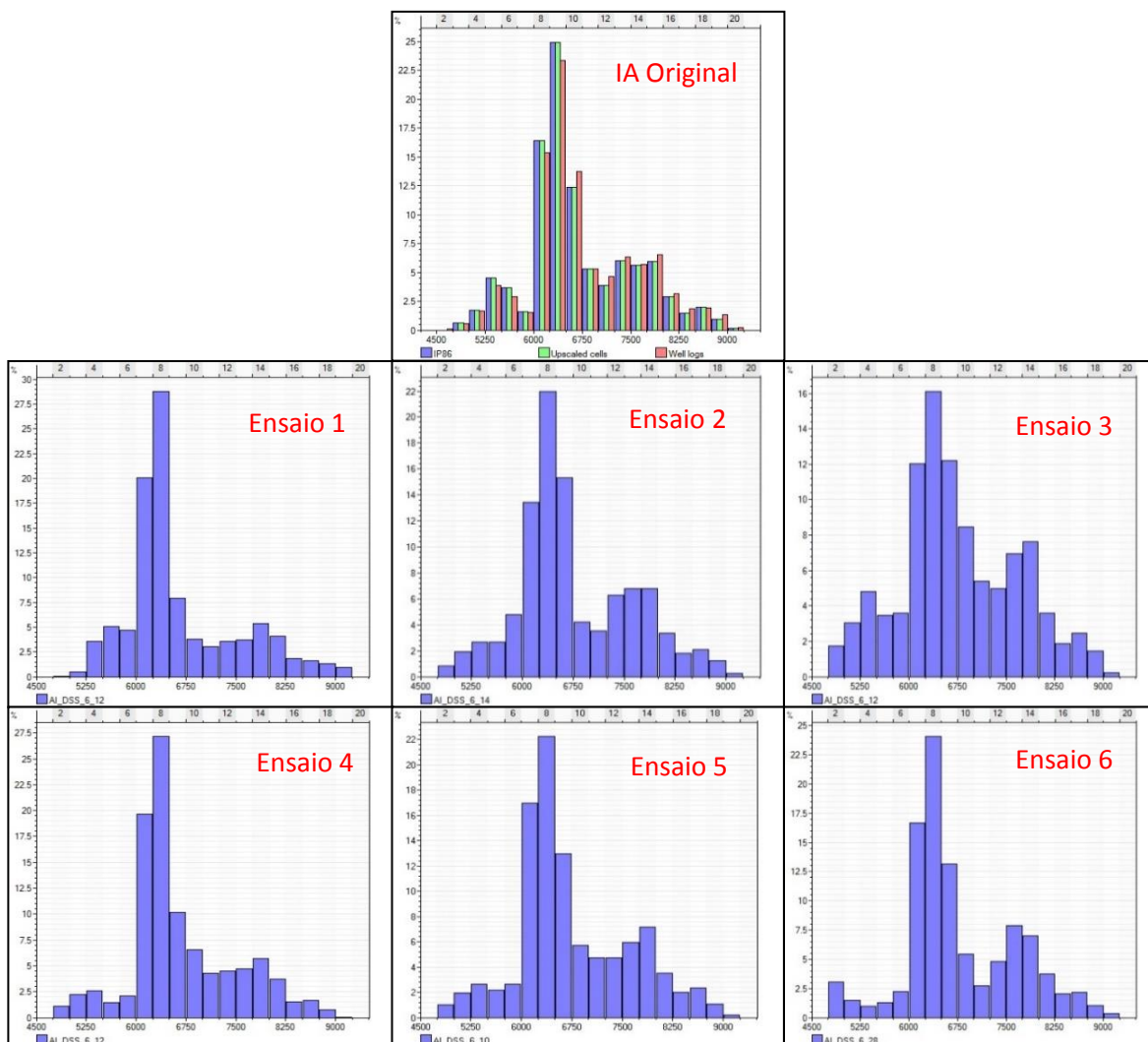
**Figura 54:** Representação da seção vertical da sísmica *partial post-stack* AVA\_20\_30\_86 original e das seções verticais das sísmicas sintéticas dos seis ensaios GEI (ver Figura 22 para localização da seção vertical).



**Figura 55:** Representação da seção vertical da sísmica *partial post-stack* AVA\_30\_40\_86 original e das seções verticais das sísmicas sintéticas dos seis ensaios GEI (ver Figura 22 para localização da seção vertical).

#### 4.4.4 Histogramas dos Modelos Sintéticos de Impedância Acústica e Elástica

Neste sub-capítulo apresentam-se os resultados da análise univariada dos melhores modelos sintéticos de IA e IE dos ensaios GEI, traduzidos pelos histogramas correspondentes. As distribuições de valores das propriedades são comparadas entre as distribuições de valores de IA e IE dos histogramas dos seis ensaios e com as distribuições dos histogramas originais.

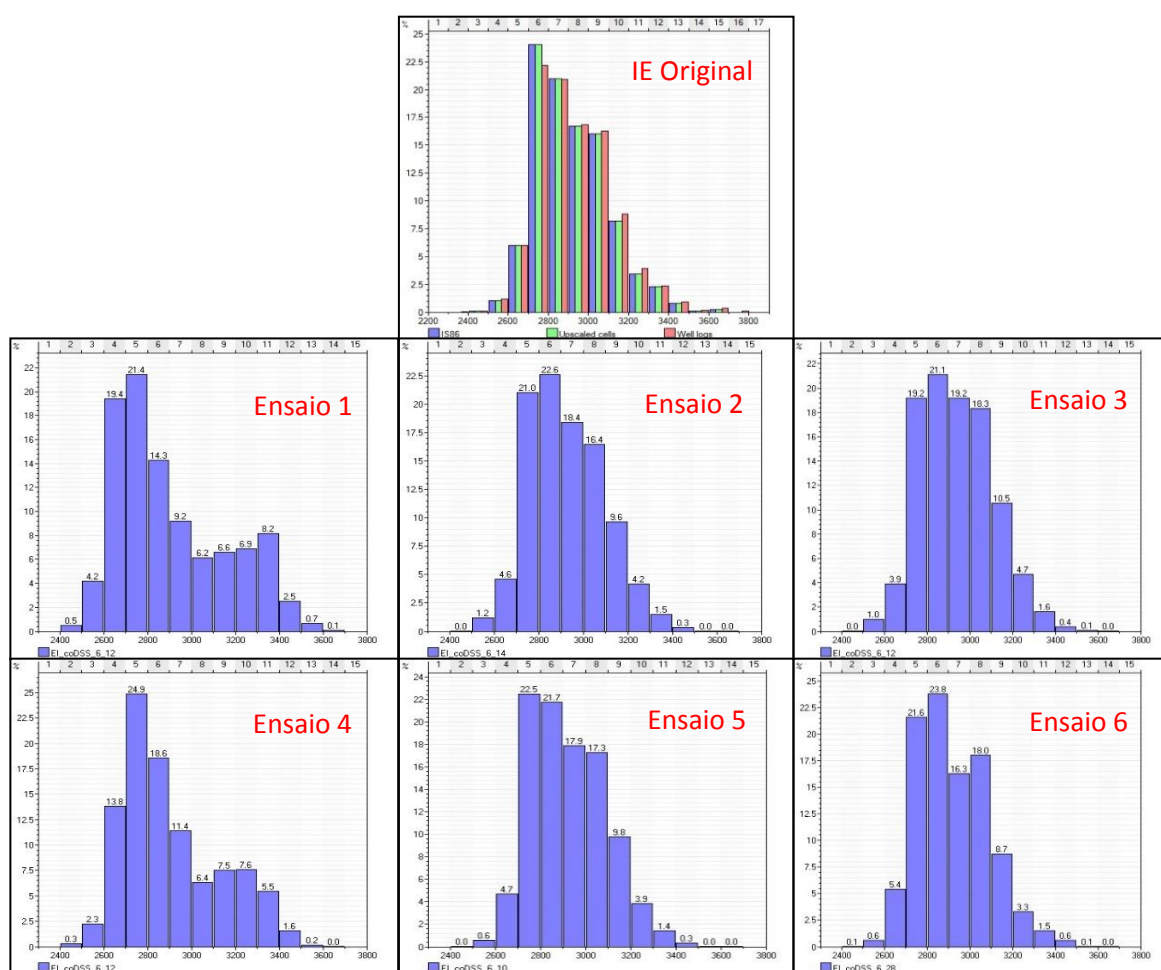


**Figura 56:** Representação do histograma original de IA e dos histogramas dos melhores modelos sintéticos de IA dos ensaios GEI.

Relativamente aos histogramas dos modelos sintéticos de IA (Figura 56), uma vez que os ensaios 2 e 6 produziram os modelos sintéticos mais aproximados dos modelos originais de IA e IE, os respetivos histogramas apresentaram também distribuições de valores



muito semelhantes à do histograma original. O ensaio 3 apresentou uma maior percentagem de classes de distribuição de valores baixos e altos de IA, em comparação com os restantes ensaios e modelo original de IA, justificando o facto de ter sido o ensaio GEI menos aproximado com o original. Nos ensaios 1 e 4 verificou-se exatamente o oposto que o ensaio 3, onde apresentou uma maior percentagem de classes de distribuição médios de IA, ficando mais escassa nas classes de valores baixos e altos de IA. O histograma do ensaio 5 apresenta distribuições muito semelhantes aos ensaios 2, 6 e ao modelo original, distinguindo-se do ensaio 2 (um dos melhores ensaios GEI), pela melhor percentagem de classes de distribuição de valores médios de IA (classes adjacentes aos 6000 kPa.s/m) e mais próxima do modelo original.



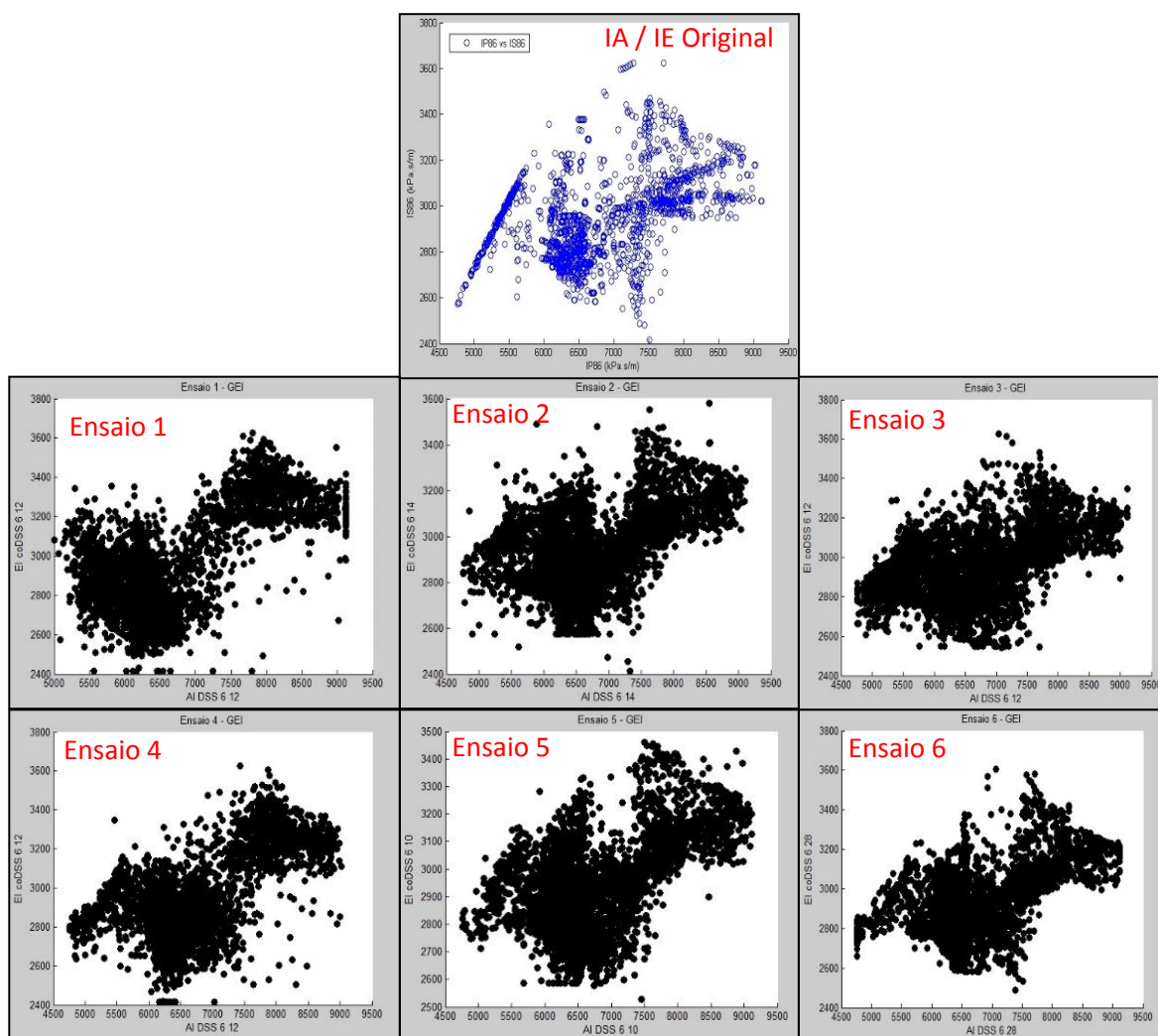
**Figura 57:** Representação do histograma original de IE e dos histogramas dos melhores modelos sintéticos de EI dos ensaios GEI.

Analisando os histogramas dos melhores modelos de EI (Figura 57), verifica-se que os dos ensaios 2, 5 e 6 foram os que apresentaram classes de distribuição de valores de EI mais aproximadas com o histograma original. Os ensaios 1 e 4 apresentaram maior

percentagem de distribuição de valores baixos de EI, escasseando mais na percentagem de valores médios de EI, comparativamente com os melhores modelos e com o modelo original. O ensaio 3 apresentou as classes com maior percentagem de distribuição de valores médios de EI (entre os valores de 2700 – 3100 kPa.s/m), no entanto as classes de valores baixos e altos de EI apresentaram percentagens mais baixas que o modelo original e que alguns dos restantes ensaios. Portanto, os ensaios 1 e 4 obtiveram distribuições de valores com um comportamento oposto que o ensaio 3.

#### 4.3.5 Bi-distribuição entre os melhores pares IA e IE de cada ensaio

Neste subcapítulo são apresentados os resultados da bi-distribuição, ou distribuição conjunta, entre os melhores pares de modelos de IA e IE, relativos a cada um dos ensaios GEI, comparando entre si e com os dados de poço originais (subcapítulo 4.1.2).



**Figura 58:** Representação da bi-distribuição entre os dados de poço originais de IA e EI (topo) e os pares dos melhores modelos sintéticos de IA e IE.

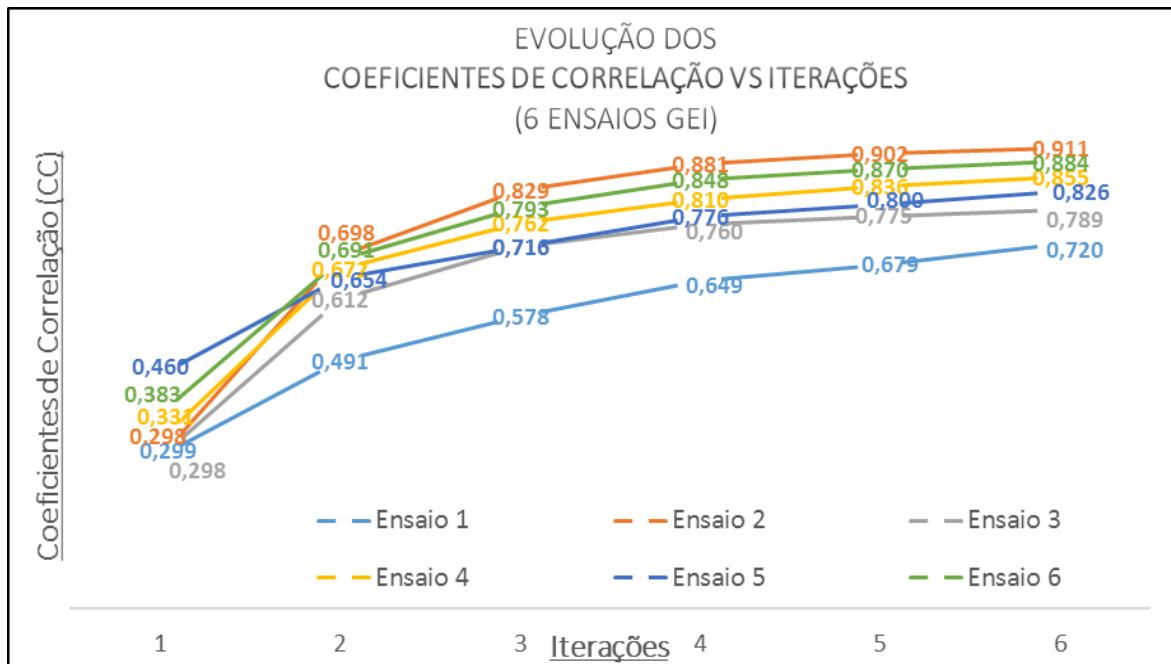
De uma maneira geral, as distribuições conjuntas e marginais, tal como estimadas dos dados de poço, foram reproduzidas nos modelos simulados (Figura 58). Como observado nos restantes resultados sintéticos GEI, onde os resultados são variáveis de ensaio para ensaio, na distribuição conjunta acontece a mesma situação. Apesar das distribuições conjuntas e marginais serem reproduzidas nos modelos, nem todas foram reproduzidas ou representadas da mesma maneira, onde se destacam as distribuições conjuntas dos ensaios 2, 5 e 6 como as mais aproximadas comparativamente com a distribuição conjunta original dos dados de poço.

#### **4.3.6 Evolução dos Coeficientes de Correlação global entre Sísmicas Sintéticas e Sísmica Original**

A evolução dos coeficientes de correlação global entre a sísmica original e as sísmicas sintéticas, relativas aos processos iterativos de cada ensaio GEI, é apresentada na Figura 59.

Analizando a evolução dos valores de CC global das corridas originais de cada ensaio, verifica-se que os ensaios 2 e 6 foram os melhores ensaios GEI, onde registaram os valores de CC globais finais mais elevados, apesar de não terem sido os ensaios com melhor correlação inicial (1ª iteração). Os ensaios 4 e 5 registaram valores finais de CC global mais baixos que os melhores ensaios, apresentando uma correlação razoavelmente boa, apesar de o ensaio 5, ter sido o que apresentou o valor de CC global inicial mais elevado de todos os ensaios. Os ensaios que apresentaram os valores mais baixos de CC global foram os ensaios 1 e 3, como já se tinha verificado nos diversos resultados obtidos nos subcapítulos anteriores. Os ensaios 1 e 5, apesar das diferenças significativas dos valores de CC global finais (0,826 e 0,720, respetivamente), foram os ensaios que menos evoluíram desde a iteração inicial e a iteração final, onde as percentagens de evolução de iteração para iteração foram muito semelhantes.

Este gráfico de evolução dos valores de CC global é relativo às corridas originais dos vários ensaios GEI realizados; a comparação e interpretação mais detalhadas são efetuadas no capítulo seguinte (subcapítulo 5.2), através dos valores médios de CC global (corridas médias).



**Figura 59:** Representação da evolução dos coeficientes de correlação global entre sísmica original e sísmicas sintéticas dos seis ensaios GEI.

# **Capítulo V:**

## **Discussão e Conclusões**



## **5.1 Comparação e discussão da evolução dos coeficientes de correlação global entre ensaios GSI**

Neste capítulo são discutidos os resultados finais obtidos nesta tese e apresentadas as conclusões principais. São apresentadas e discutidas as evoluções dos coeficientes de correlação global da repetição de seis corridas para cada um dos ensaios dos dois métodos de inversão geoestatístico de forma a evitar o enviezamento dos resultados. Para finalizar a discussão desta dissertação, são comparados e discutidos os resultados dos dois melhores ensaios de cada método geoestatístico utilizado e apresentadas as conclusões gerais desta tese.

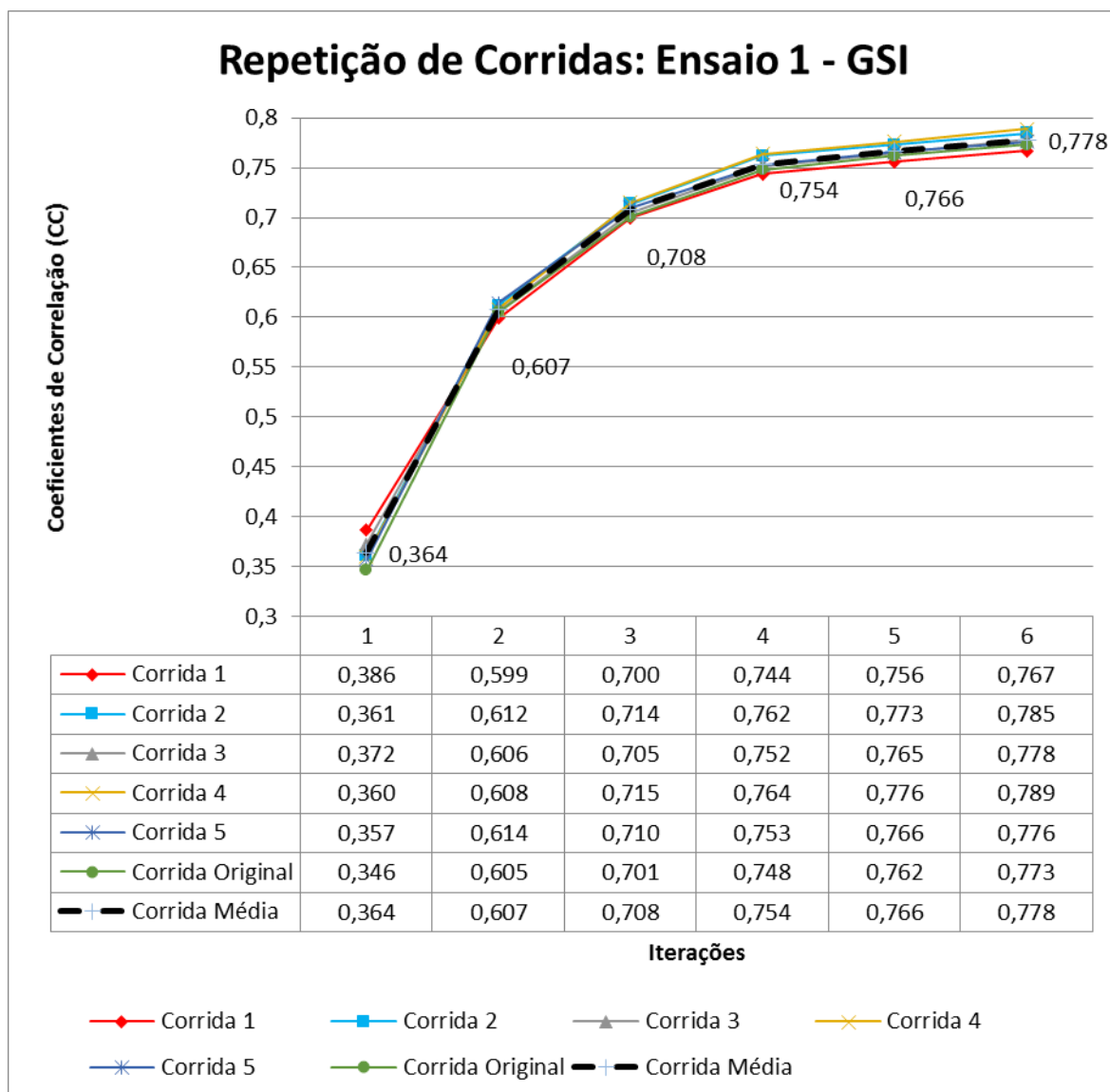
A repetição de corridas, referentes a cada um dos seis ensaios de ambos os métodos geoestatísticos, consistiu na repetição de todos os processos de inversão, seis vezes, para cada um dos ensaios. Realizar as repetições para cada um dos ensaios permite obter uma significância estatística dos resultados obtidos no capítulo anterior. De uma forma geral, a diferença entre as seis corridas para cada um dos ensaios pode considerar-se residual, permitindo desta forma retirar conclusões sobre a abordagem proposta.

Relativamente à metodologia GSI, o ensaio 1 (Figura 60) obteve, como resultados finais, seis corridas maioritariamente regulares relativamente à corrida média.

Os valores médios de coeficientes de correlação variam cerca de 0,40 desde o início da inversão até ao final, em que, apesar da corrida 1 ter sido a que, na 1ª iteração, apresentou o valor de CC mais alto (relativamente à média), foi a corrida do ensaio 1 que apresentou o valor mais baixo, na última iteração do processo de inversão.

A Figura 61, relativa ao ensaio 2, apresenta 6 corridas com valores médios de CC muito equivalentes e regulares. No entanto, pode-se constatar que, a partir da 3ª iteração até ao fim, houve uma ligeira descida de valores de CC referentes à corrida 2.

Os valores médios dos coeficientes de correlação, deste ensaio, evoluíram cerca de 0,35 desde a iteração inicial até ao final do processo de inversão.

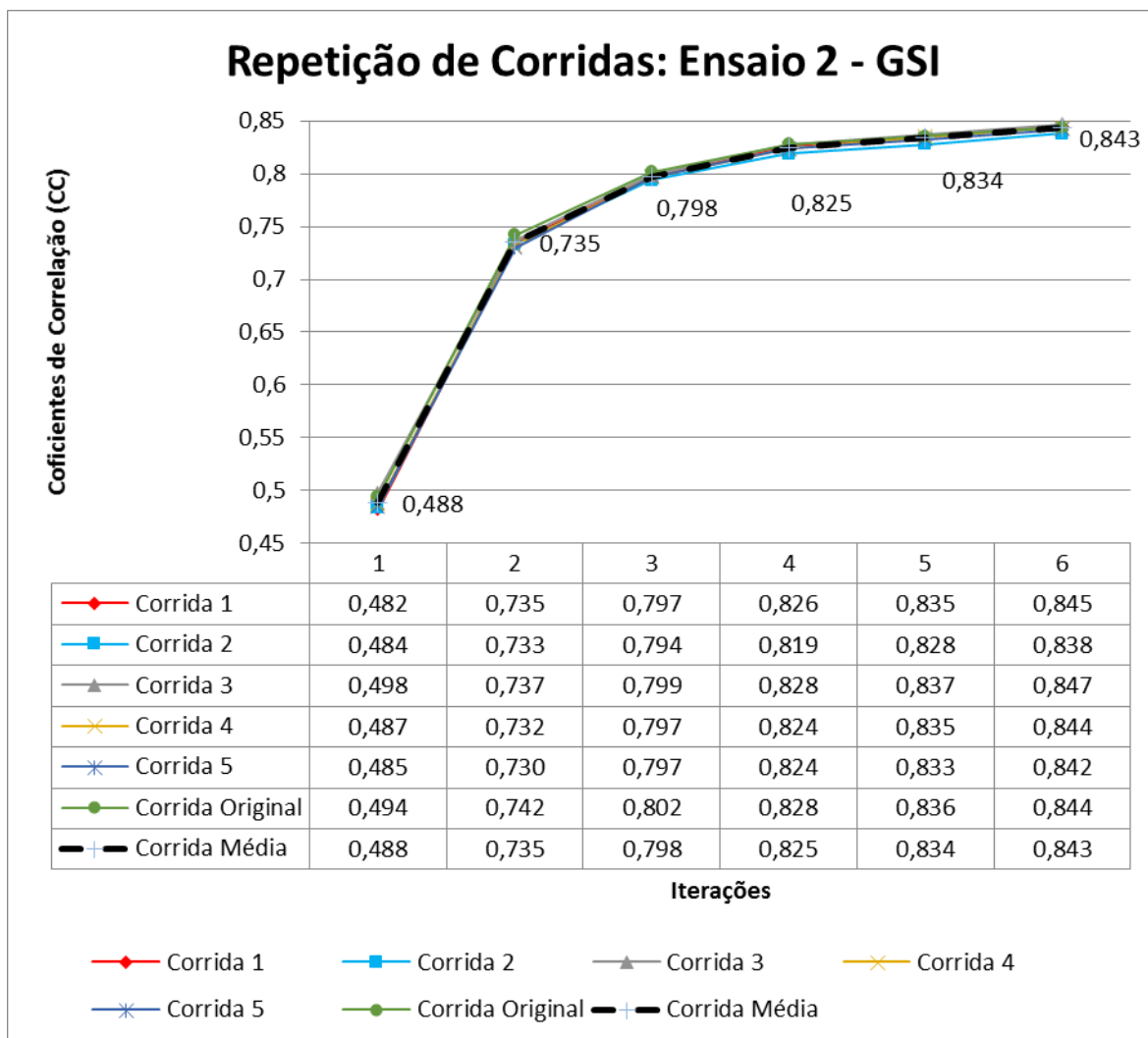


**Figura 60:** Representação gráfica da evolução dos coeficientes de correlação global relativos à repetição de corridas do ensaio 1 do método GSI.

Relativamente ao ensaio 3, Figura 62, no final da 1ª iteração a corrida 1 apresentou valores mais baixos em relação à corrida média, ao passo que a corrida 5 se manifestou com valores acima dos valores médios, o resto das corridas mantiveram-se na média. A partir da 2ª iteração até ao fim, todas as corridas apresentam valores que se mantiveram estáveis, em relação à corrida média. Por outro lado a corrida 4 obteve valores acima da média e da corrida original, que manteve sempre valores ligeiramente abaixo da média.

Os valores médios de CC variaram cerca de 0,30, desde a iteração inicial até à final, no entanto, apresentou um valor final (após a 6ª iteração) de CC inferior ao das restantes repetições de corridas.

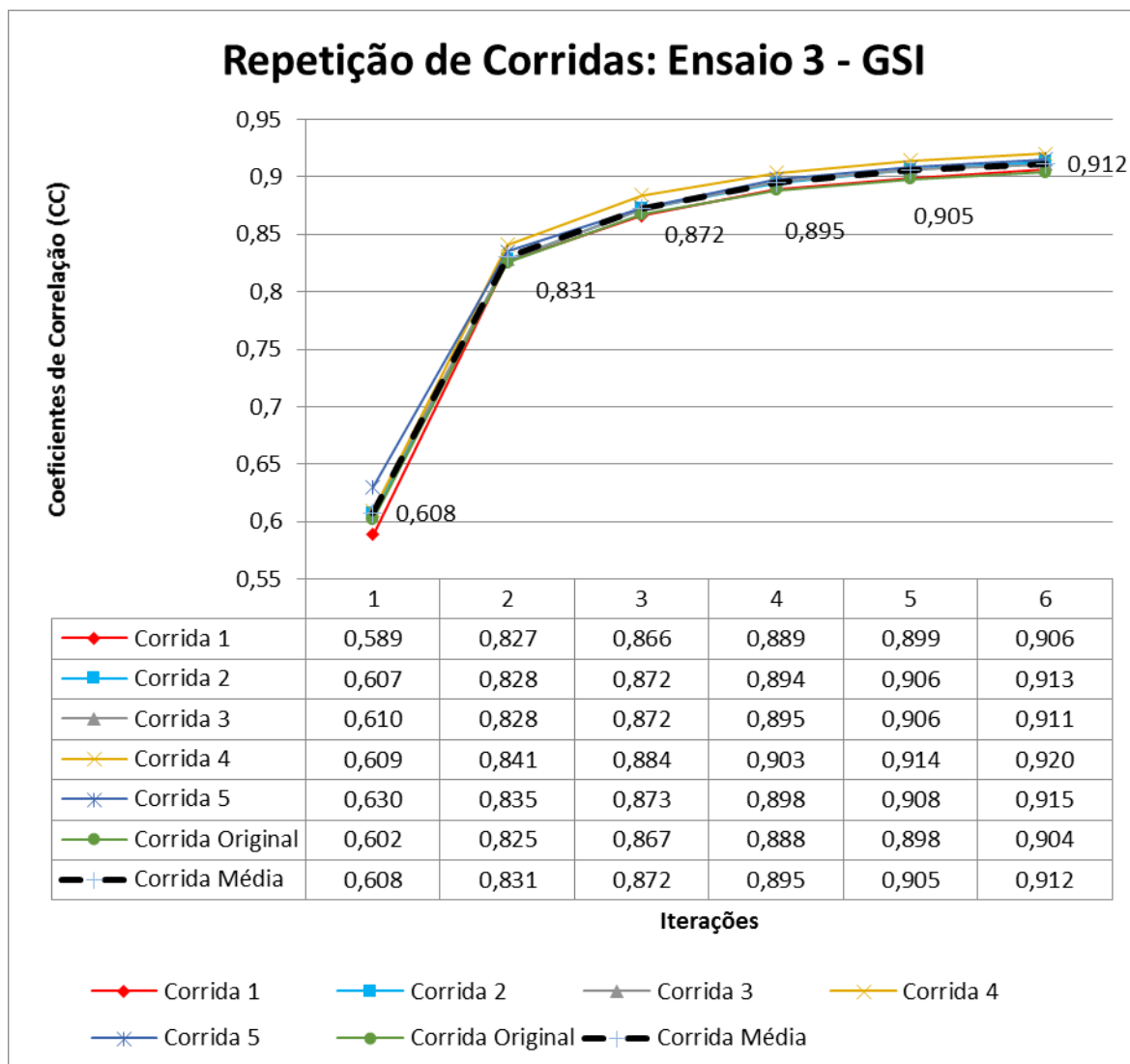




**Figura 61:** Representação gráfica da evolução dos coeficientes de correlação global relativos à repetição de corridas do ensaio 2 do método GSI.

No final da iteração inicial do ensaio 4, Figura 63, as corridas 1 e 4 obtiveram valores de CC um pouco acima da média, ao contrário da corrida 3 que obteve ligeiramente abaixo. A partir da 2ª iteração, tirando a corrida original que teve valores mais regulares com a média, todas as outras corridas divergiram ligeiramente da média: algumas com valores mais altos (corrida 2), outras com valores mais baixos (corrida 4).

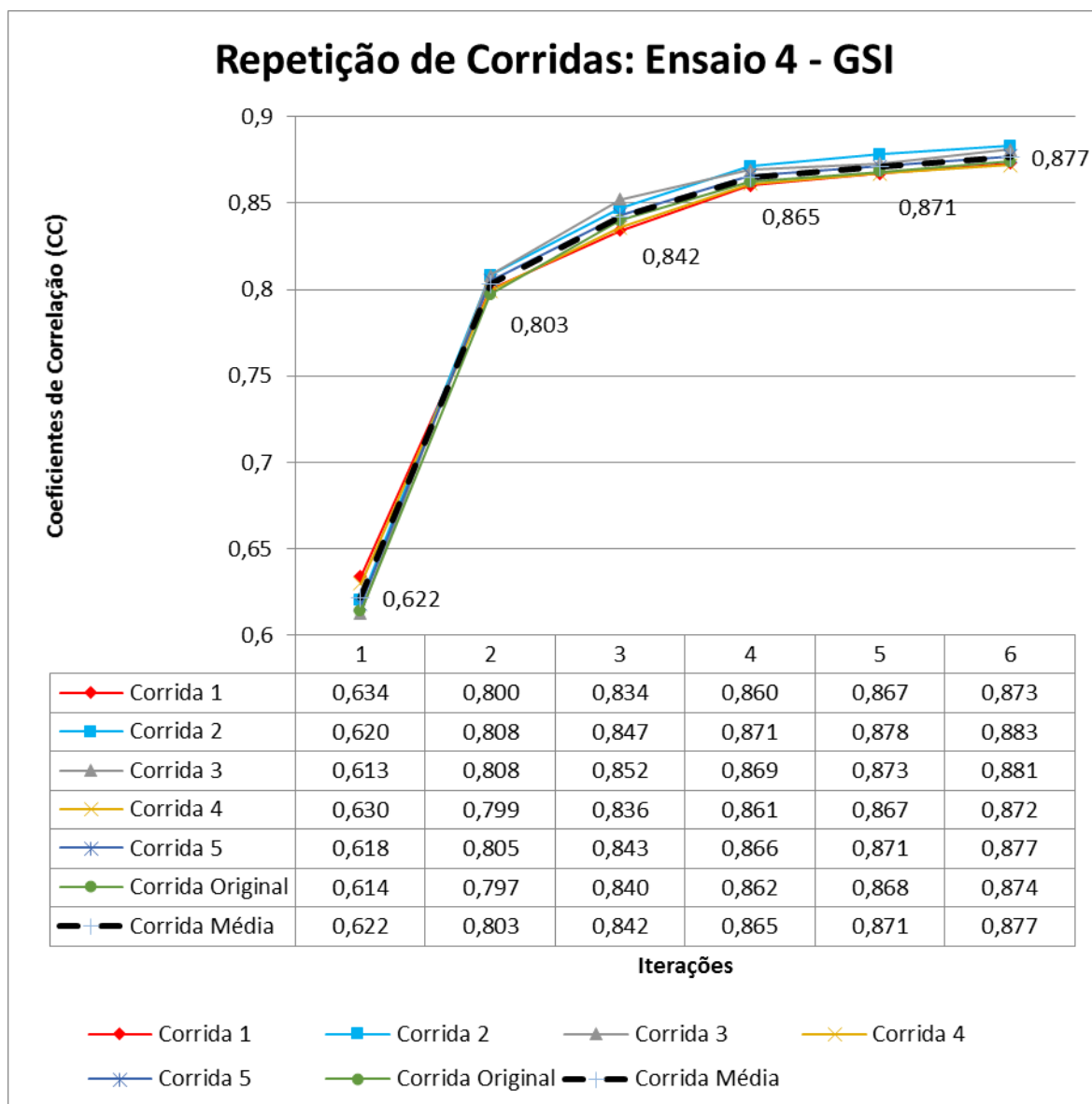
Os valores de coeficientes de correlação sofreram uma evolução na ordem das 0,25 desde a iteração inicial até ao final, em que apenas entre a 1ª e 2ª iterações, a variação é cerca de 0,18 unidades e nas restantes 4 iterações variaram somente 0,07 unidades, constatando-se, assim uma rápida e significativa evolução de valores nesse intervalo (até à 2ª iteração).



**Figura 62:** Representação gráfica da evolução dos coeficientes de correlação global relativos à repetição de corridas do ensaio 3 do método GSI.

Relativamente ao ensaio 5 (Figura 64), após a iteração inicial, todas as corridas apresentaram valores na média à exceção da corrida 4 (que obteve valores mais altos) e da corrida 2 (que obteve valores mais baixos). Posteriormente, ocorreu uma convergência de valores na 2ª iteração, voltando a divergir até ao final do processo de inversão. Destaca-se também a corrida 3 que obteve valores de CC finais acima da média, ao passo que a corrida 2 apresentou valores abaixo (como praticamente em todo o processo, relativamente à média e restantes corridas).

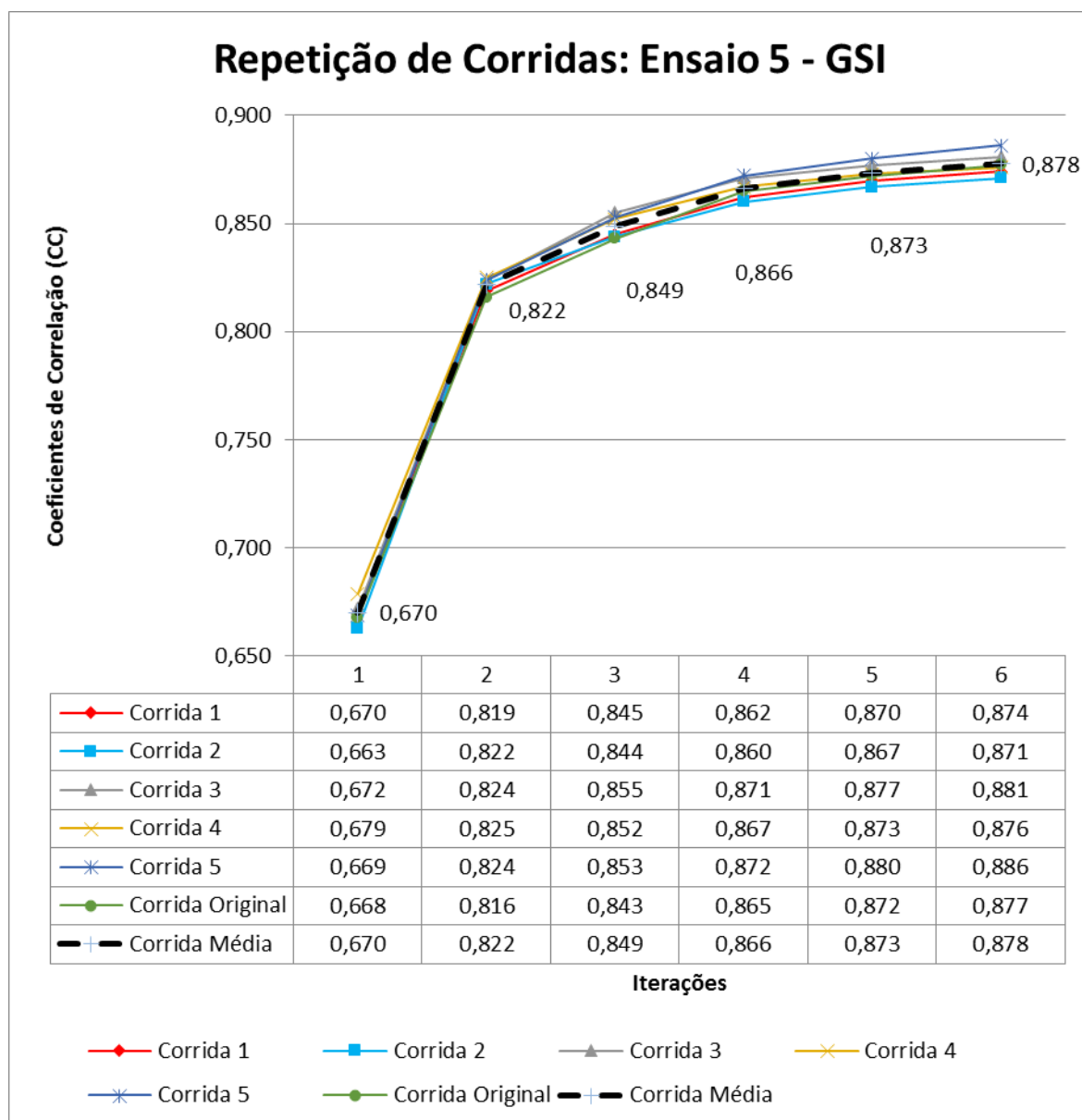
Os valores de coeficientes de correlação evoluíram cerca de 0,20 desde a iteração inicial até ao final do processo de inversão sísmica.



**Figura 63:** Representação gráfica da evolução dos coeficientes de correlação global relativos à repetição de corridas do ensaio 4 do método GSI.

Durante todo o ensaio 6 (Figura 65), todas as corridas apresentaram valores próximos aos da média, à exceção da corrida 5, que apresenta sempre valores ligeiramente mais elevados em todas as iterações, e da corrida 4 que, a partir da 2ª iteração, manifestou sempre valores ligeiramente inferiores (apenas décimas ou centésimas de diferença).

Os valores de coeficientes de correlação variaram cerca de 0,28 desde a iteração inicial até ao final.

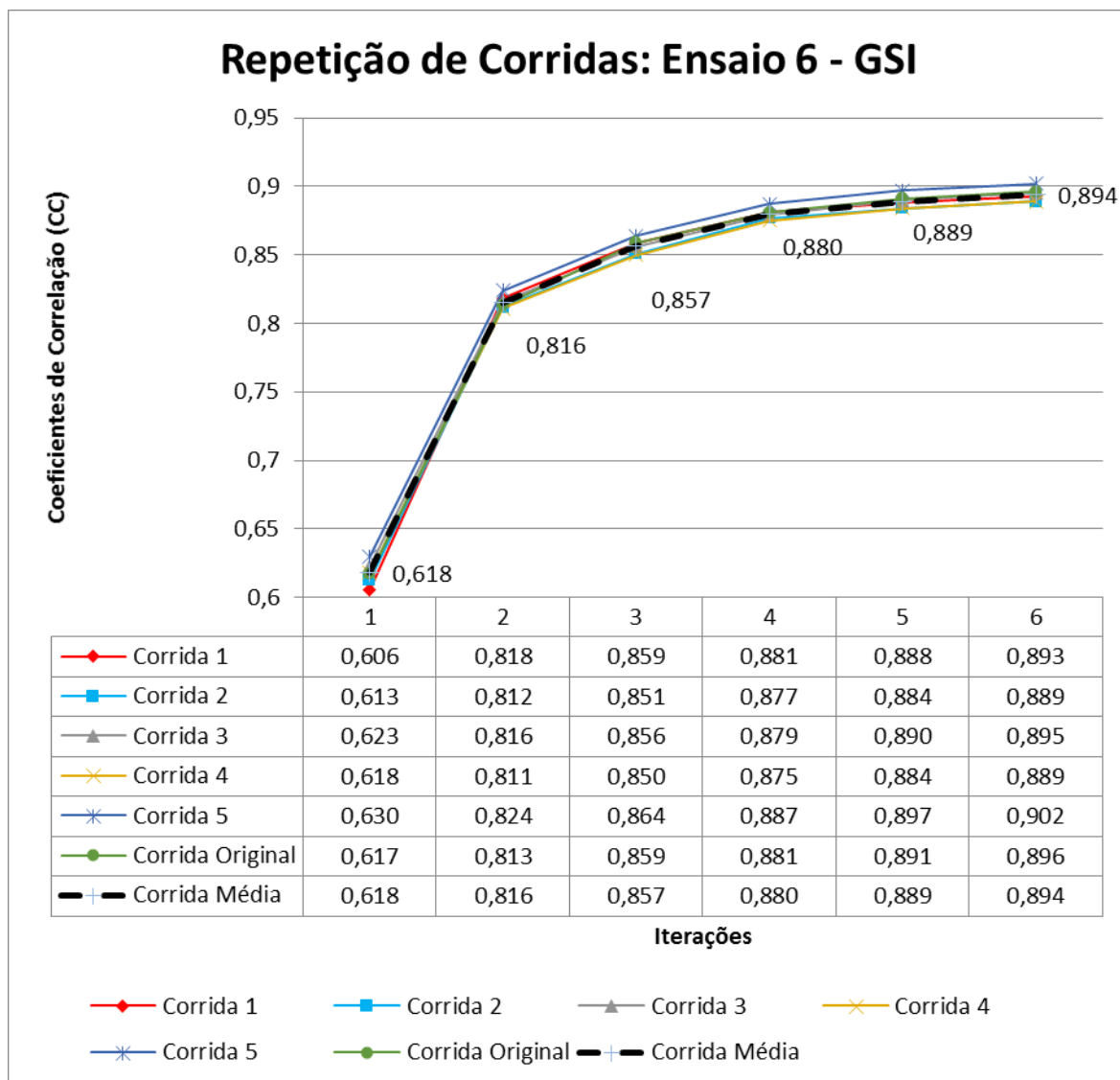


**Figura 64:** Representação gráfica da evolução dos coeficientes de correlação global relativos à repetição de corridas do ensaio 5 do método GSI.

Após uma interpretação e discussão mais detalhada das diversas corridas efetuadas dentro de cada ensaio GSI, o gráfico da Figura 66, cinge-se apenas às corridas médias, uma vez que estes valores de CC global são os mais representativos de cada ensaio, para uma melhor avaliação dos mesmos.

Todos os ensaios GSI apresentaram uma subida mais significativa e acentuada entre a iteração inicial e a 2ª iteração, atingindo valores de CC a evoluir até 0,30 de diferença, como no caso do ensaio 2. Estas significativas subidas de coeficiente de correlação devem-se aos valores obtidos no final da 1ª iteração não serem condicionados pelos

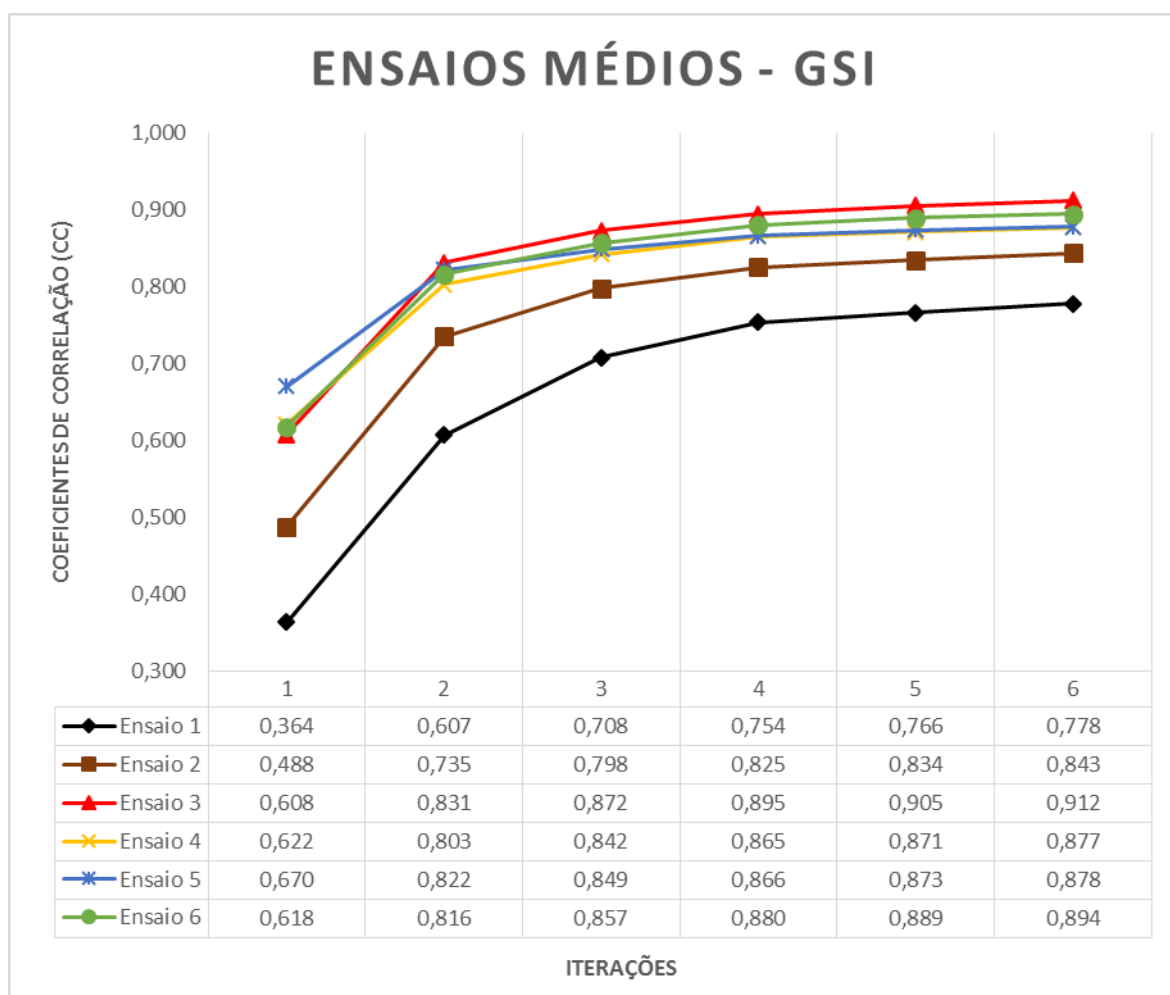
dados de reflexão sísmica uma vez que os dados de poço são os únicos que condicionam as simulações estocásticas durante a primeira iteração.



**Figura 65:** Representação gráfica da evolução dos coeficientes de correlação global relativos à repetição de corridas do ensaio 6 do método GSI.

Como entre a 2ª iteração e a iteração final do processo de inversão já existe condicionamento aos dados de reflexão sísmica, as percentagens de evolução dos valores de CC global são menores, gerando subidas menos significativas. Como foi referido anteriormente nas representações das corridas originais (subcapítulo 4.3.4), os melhores ensaios baseados na metodologia geoestatística GSI foram os ensaios 3 e 6 que apresentaram valores de coeficientes de correlação global mais elevados. O ensaio 1, apesar de ter sido o que obteve o valor médio de CC final mais baixo, foi de todos os

ensaios o que apresentou uma maior evolução nos valores médios de CC global, entre a iteração inicial e iteração final, no intervalo de cerca de 0,41 unidades. O ensaio 5 apresentou o melhor valor inicial médio de CC global de todos os ensaios, estabilizando a sua evolução a partir da 2ª iteração, obtendo um valor médio final praticamente igual ao ensaio 4, contudo inferiores aos ensaios 3 e 6. Os ensaios 4 e 5 obtiveram comportamentos de evolução opostos aos ensaios 3 e 6, na primeira iteração e nas iterações seguintes, uma vez que os volumes auxiliares de IA gerados (dos ensaios 4 e 5) foram menos representativos da 1ª para a 2ª iteração, bem como a sísmica invertida, durante o processo de inversão, ter tido menor convergência. Os ensaios 1 e 2 obtiveram uma percentagem de evolução dos valores médios de CC global muito semelhante de iteração para iteração.



**Figura 66:** Representação gráfica da evolução dos coeficientes de correlação global relativos aos ensaios médios do método GSI.

A correcta divisão do modelo original em *overburden*, reservatório e *underburden* permitiu aumentar o coeficiente de correlação global em 0.2 relativamente ao ensaio sem divisão de zonas. Isto verificou-se para o caso dos ensaios 3 e 6 que consistem nos modelos com três zonas (*overburden*, reservatório ajustado e *underburden*) e com nove zonas uniformemente divididas, respetivamente (ver Figura 25). O ensaio 1 que corresponde a uma zona global, apresentando assim menor estacionaridade, foi o ensaio que apresentou CC global médio mais baixo. O ensaio 2 apresentou um CC global médio inferior ao do ensaio 3, apesar de ambos terem três divisões, pois a sua zona de reservatório encontra-se menos ajustada abrangendo áreas com valores de impedância e elementos estatísticos diferentes, relativamente ao reservatório. O ensaio 4 seria de esperar não apresentasse o melhor CC global final, comparativamente com os restantes ensaios, uma vez que a zona de *overburden* e *underburden* são assumidos como correspondendo à mesma distribuição local e apresentam estatísticos diferentes entre si. Este ensaio apresentava apenas a zona de reservatório e a de não-reservatório. O ensaio 5, que em comparação com o melhor ensaio (ensaio 3) apresentava ainda a zona de reservatório dividida em duas zonas, conferindo-lhe mais estacionaridade; no entanto o valor de CC global foi ligeiramente inferior (diferenças residuais) pelo que, para este modelo original de IA, não se justificaria esta sub-divisão.

## **5.2 Comparação e discussão da evolução dos coeficientes de correlação global entre ensaios GEI**

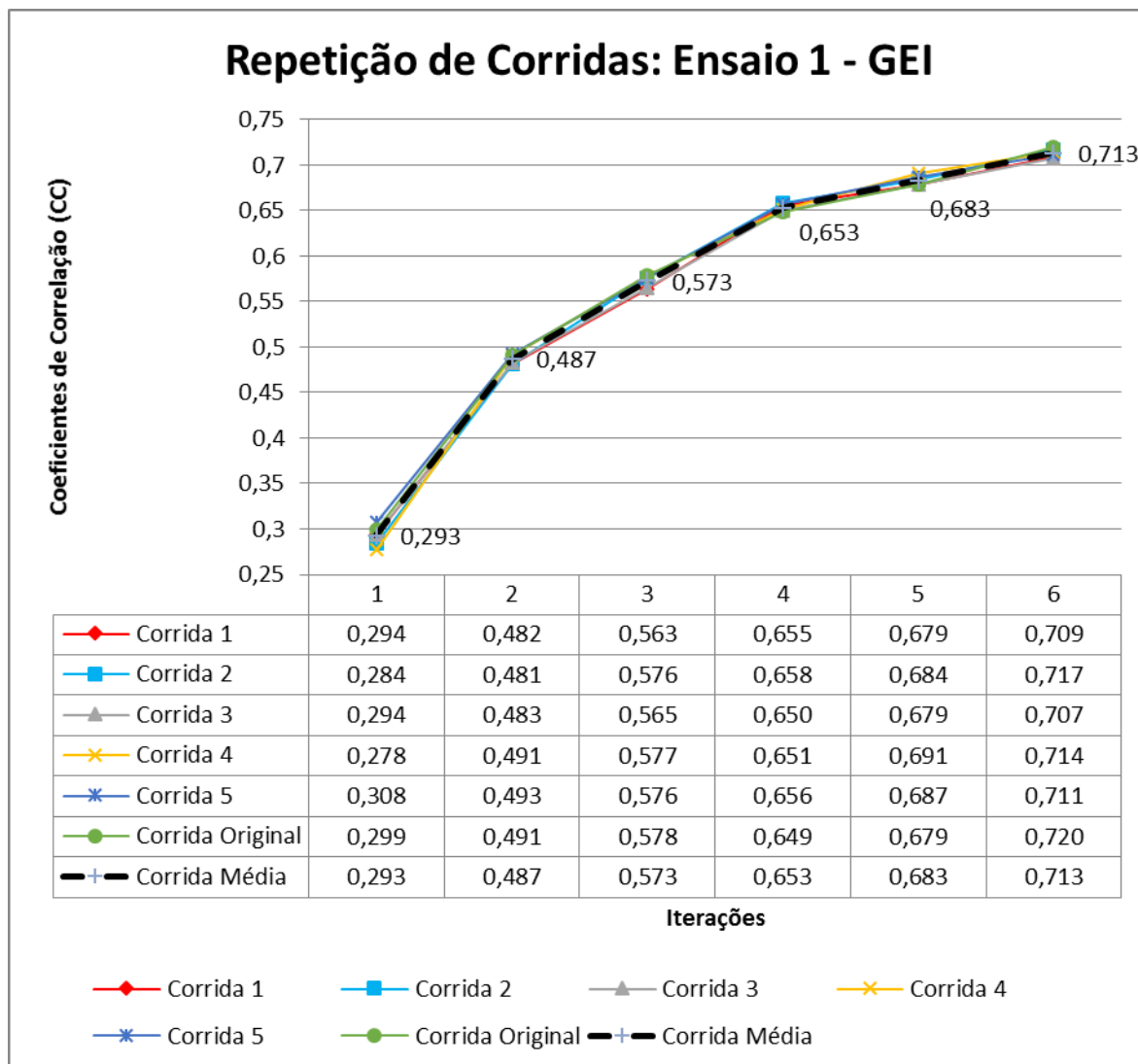
O ensaio 1 (Figura 67) apresenta seis corridas com valores de coeficientes de correlação muito regulares relativamente à média, à exceção dos valores gerados na iteração inicial que diferem um pouco (a corrida 5 como valor extremo mais alto e a corrida 4 como o valor mais baixo, comparando com o valor médio).

Os CC médios variam cerca de 0,40 entre a 1ª iteração e a 6ª iteração, em que 0,20 foram apenas na evolução do processo de inversão, entre a iteração inicial e a 2ª iteração.

Quanto à repetição de corridas do ensaio 2 (Figura 68), a maioria dos valores das corridas do ensaio 2 mantêm-se regulares em relação aos valores médios, à exceção da corrida original. A corrida original deste ensaio apresenta, na 1ª iteração, um valor de CC ligeiramente inferior ao valor médio e ao das restantes corridas, no entanto, a partir da 1ª

iteração até ao final, destaca-se por apresentar valores de CC mais elevados (tanto em relação à média como às outras corridas).

Os coeficientes de correlação médios, deste ensaio, evoluíram cerca de 0,55 unidades entre a iteração inicial e a final da simulação, em que mais de 0,30 foram só entre a 1ª e 2ª iteração.



**Figura 67:** Representação gráfica da evolução dos coeficientes de correlação global relativos à repetição de corridas do ensaio 1 do método GEI.

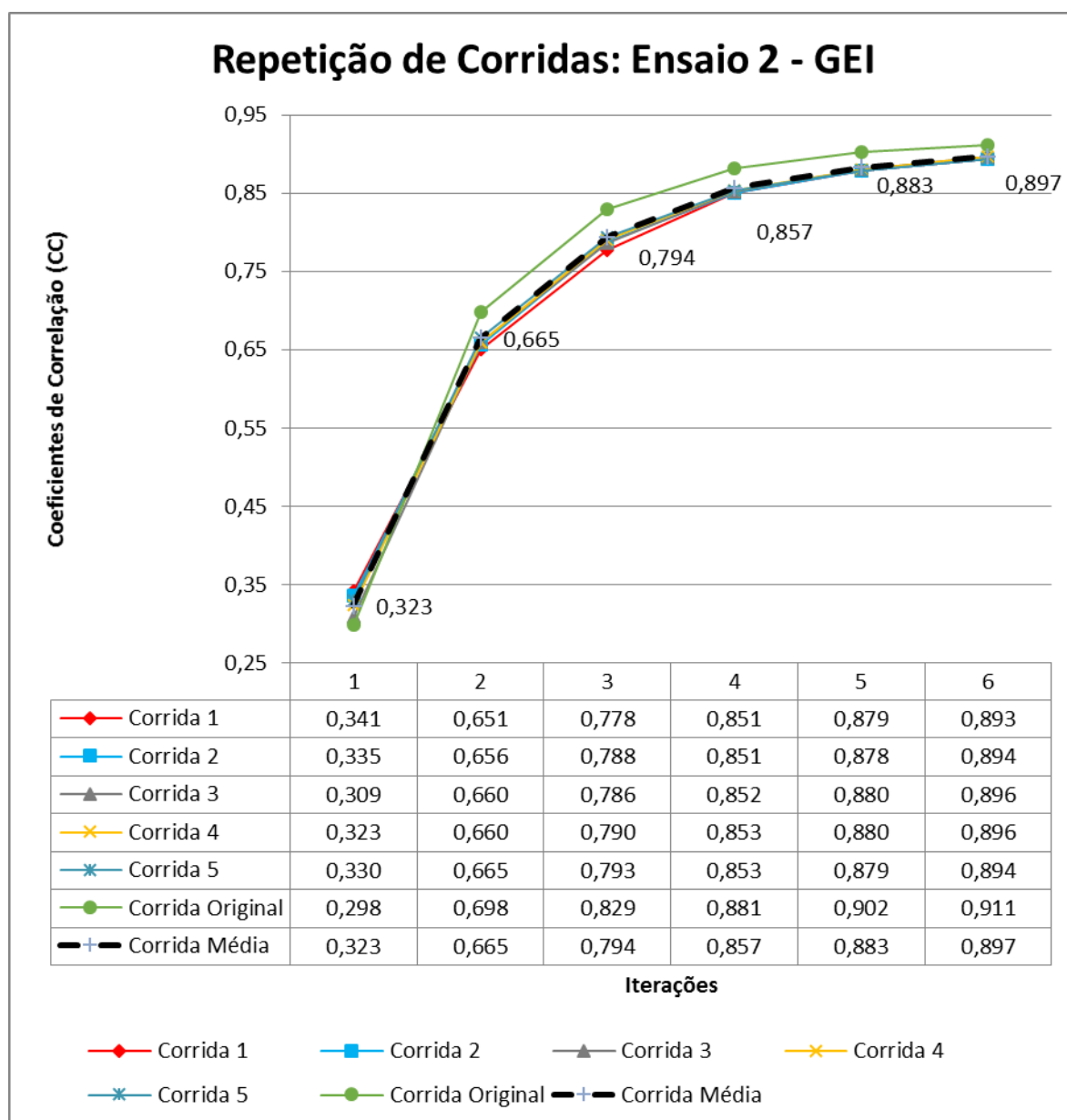
Praticamente todas as corridas do ensaio 3 (Figura 69) apresentam valores na média, à exceção essencialmente da corrida original que, a partir da 1ª iteração até ao final, se destaca por apresentar valores de coeficientes de correlação ligeiramente mais elevados, relativamente à média. Na iteração inicial, a corrida original apresenta um valor de CC praticamente igual ao valor médio, ao contrário da corrida 2 que se destaca por ser a



corrida que tem o valor mais alto e mais discrepante, ao passo que a corrida 5 apresenta um valor ligeiramente abaixo da média.

Os CC médios variaram cerca de 0,46 desde o início até ao final do processo de inversão, tendo mais de metade deste valor de evolução ocorrido entre a iteração inicial e o final da inversão.

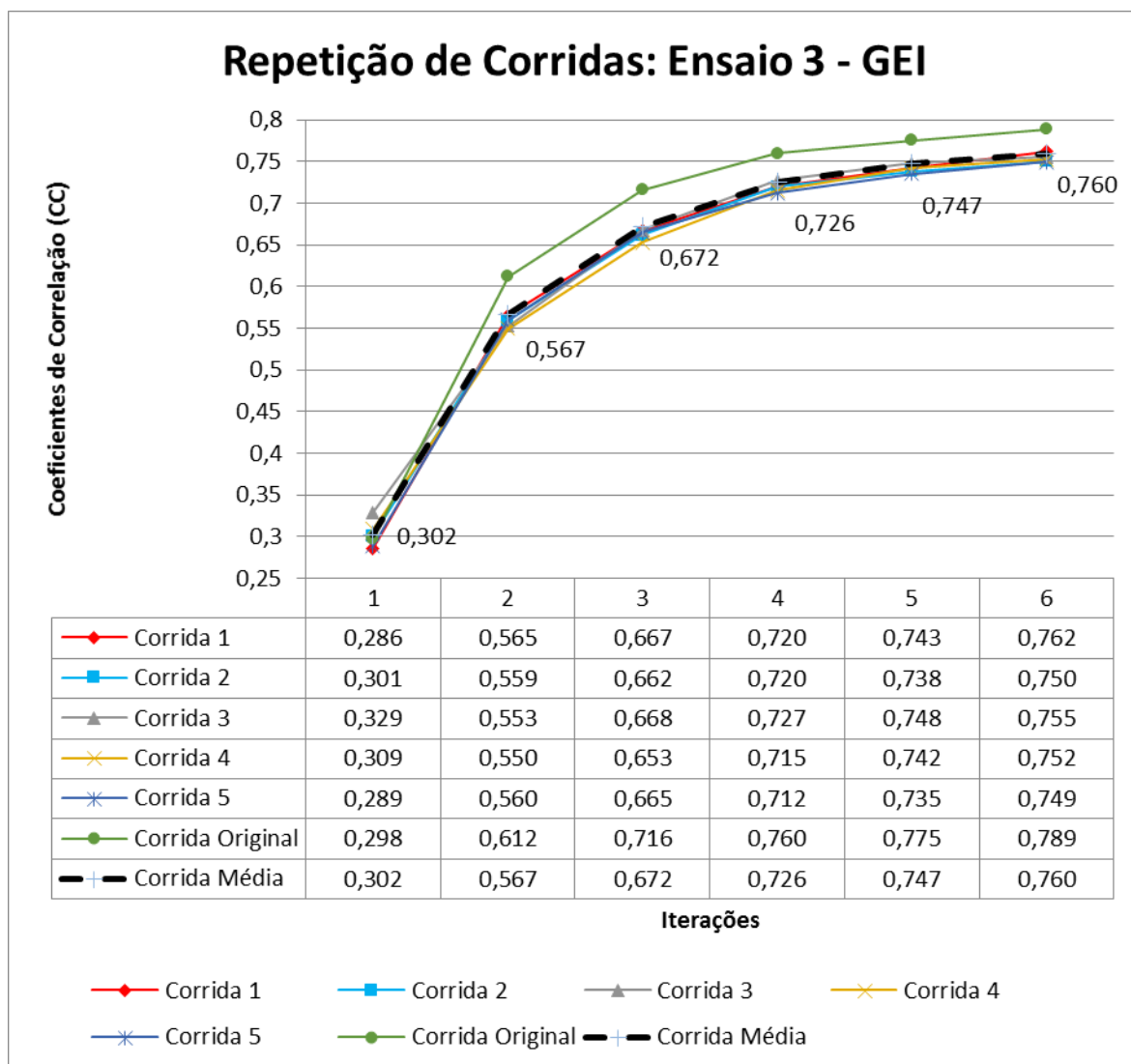
Os CC médios variaram cerca de 0,46 desde o início até ao final do processo de inversão, em que mais de metade deste valor de evolução ocorreu entre a iteração inicial e a final da inversão.



**Figura 68:** Representação gráfica da evolução dos coeficientes de correlação global relativos à repetição de corridas do ensaio 2 do método GEI.

O ensaio 4 (Figura 70), todas as corridas do ensaio 4 mantêm-se na média, excluindo a corrida original que, na iteração inicial até apresentou um valor abaixo mas, a partir da 1ª iteração até ao final, destaca-se por apresentar valores de CC ligeiramente mais elevados, relativamente à média.

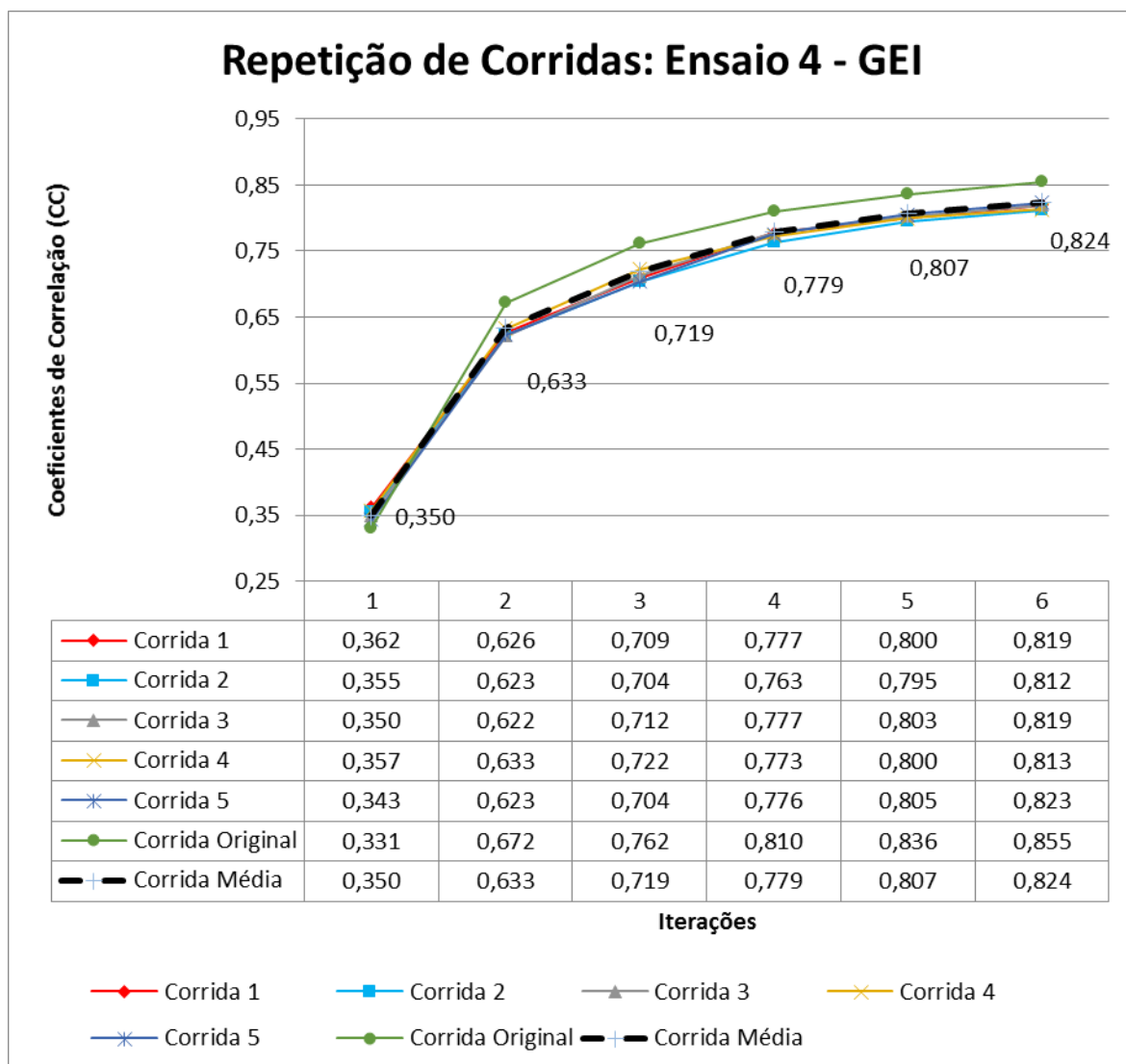
Os valores dos coeficientes de correlação da corrida média e das corridas do ensaio evoluíram cerca de 0,50 entre a 1ª iteração e a 6ª iteração da inversão.



**Figura 69:** Representação gráfica da evolução dos coeficientes de correlação global relativos à repetição de corridas do ensaio 3 do método GEI.

A Figura 71 apresenta as corridas do ensaio 5, as quais foram muito regulares comparativamente à corrida média, a única discrepância que houve (e foi mínima, às centésimas) foi em relação à corrida 5 que apresentou valores ligeiramente abaixo, em algumas iterações (nomeadamente as iterações 2, 4 e 6).

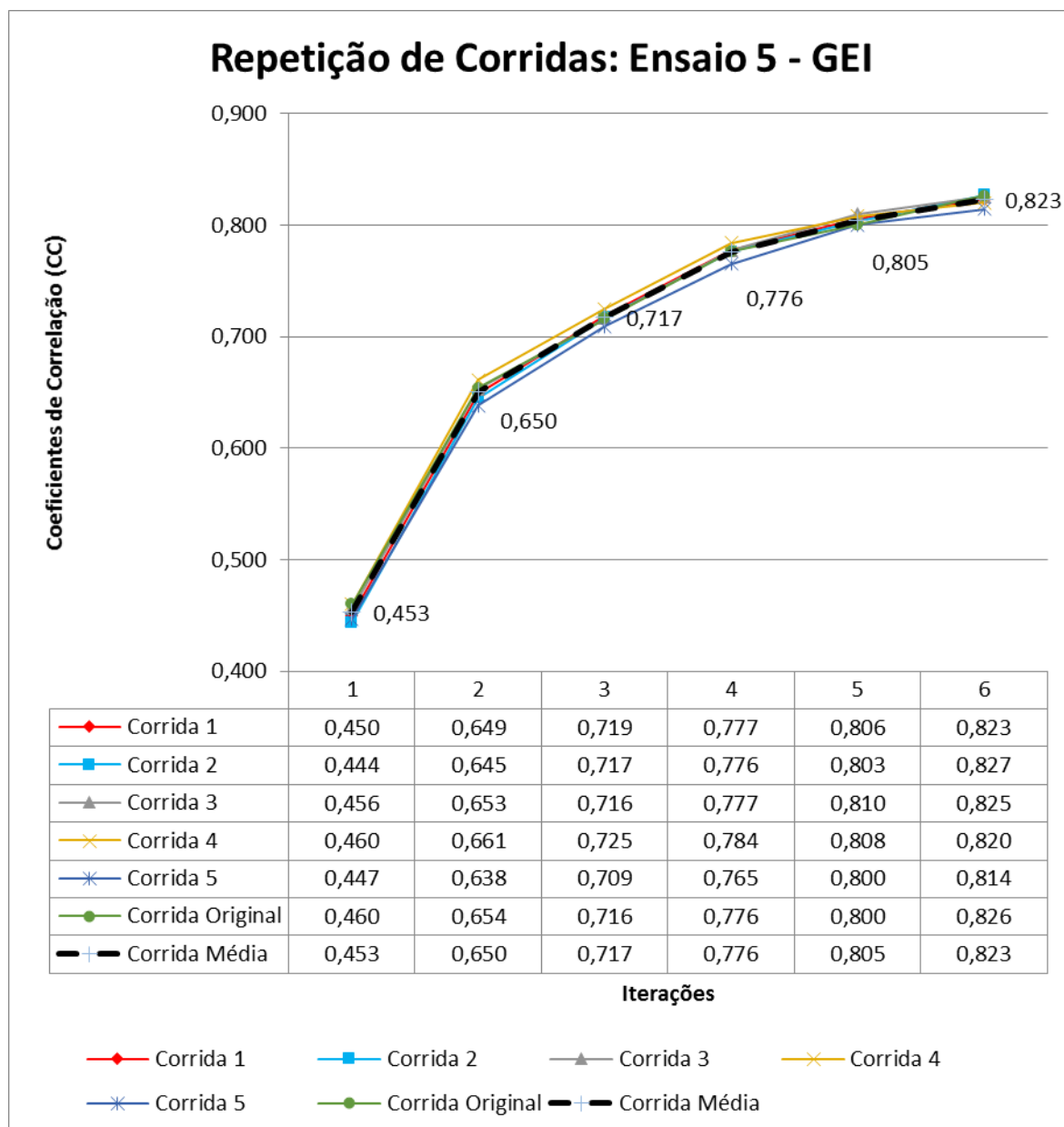
Os valores de CC variam cerca de 0,35, desde o início até ao final do processo de inversão.



**Figura 70:** Representação gráfica da evolução dos coeficientes de correlação global relativos à repetição de corridas do ensaio 4 do método GEI.

Relativamente ao último ensaio (Figura 72), todas as corridas apresentaram valores de CC muito regulares relativamente à média do ensaio, à exceção da iteração inicial, em que a corrida 3 obteve um valor significativamente mais alto e a corrida 4 um valor ligeiramente abaixo do valor médio. Durante a 1ª iteração de todas as corridas, foram gerados modelos com valores de CC a variarem um pouco, relativamente aos valores médios, iniciando-se uma convergência, a partir da 2ª iteração, dos valores de todas as corridas em comparação com a média do ensaio.

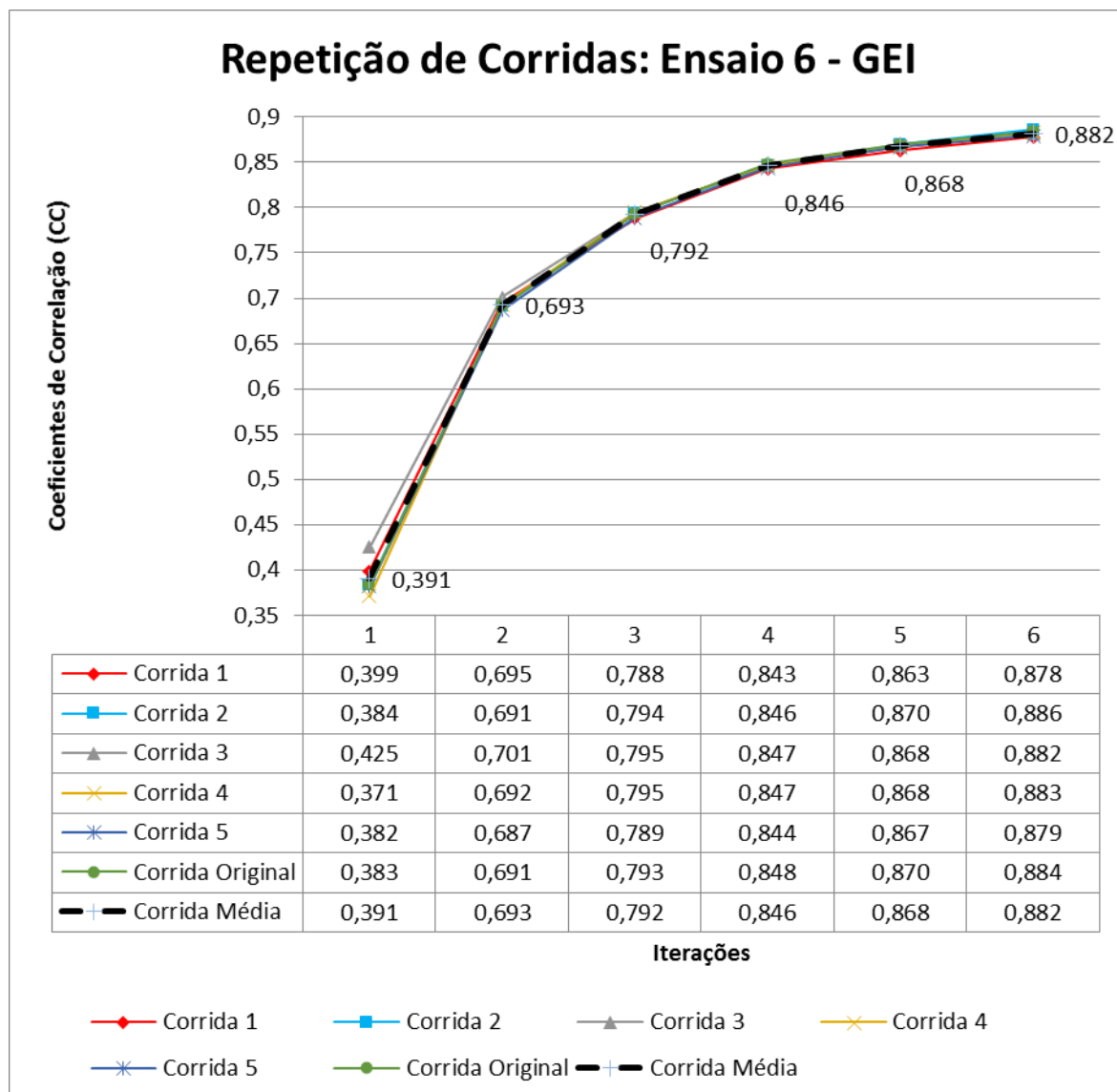
Os valores de médios dos coeficientes de correlação evoluíram cerca de 0,5 entre a 1ª iteração e a 6ª iteração.



**Figura 71:** Representação gráfica da evolução dos coeficientes de correlação global relativos à repetição de corridas do ensaio 5 do método GEI.

Uma vez discutidas as evoluções dos valores de CC global das várias corridas efetuadas, relativamente a cada um dos seis ensaios, verificou-se que, apenas nos ensaios 2, 3 e 4, as corridas originais obtiveram valores de CC global, ligeiramente superiores, às repetições dos respetivos ensaios, a partir da 2ª iteração. Isto deve-se ao facto de as simulações realizadas serem estocásticas e, ao final da 2ª iteração, os volumes

(modelos) auxiliares obtiveram uma melhor correlação e valor de CC global, mantendo-se a sempre superior às restantes corridas durante o processo de inversão.

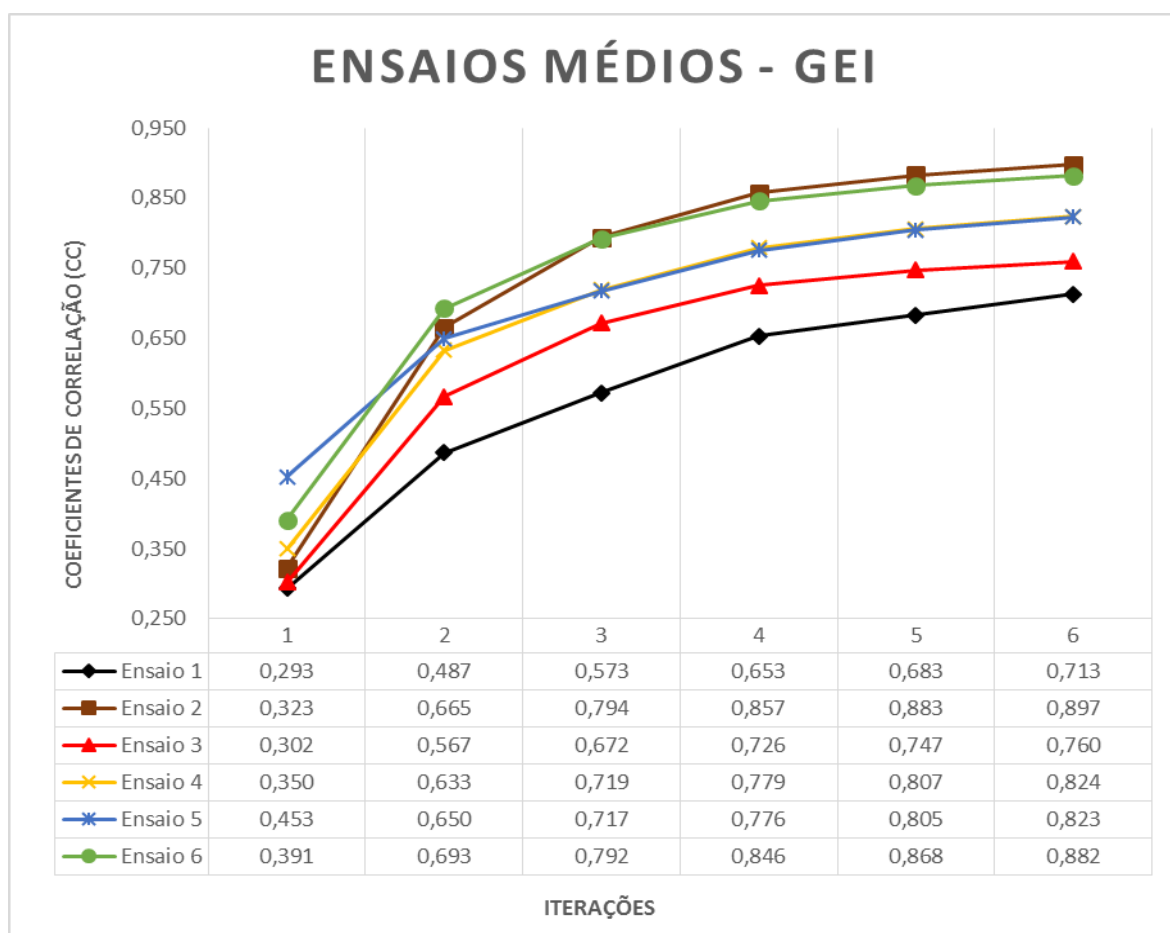


**Figura 72:** Representação gráfica da evolução dos coeficientes de correlação global relativos à repetição de corridas do ensaio 6 do método GEI.

A representação gráfica da Figura 73 apresenta e avalia globalmente a evolução dos valores médios finais de CC de cada ensaio, dentro desta metodologia geoestatística utilizada.

Assim, concluiu-se que os ensaios 2 e 6 foram os melhores ensaios GEI, apresentando os valores médios finais de CC global mais elevados e muito semelhantes entre si. Por outro lado, os ensaios 1 e 3 foram os que obtiveram valores mais baixos, principalmente o ensaio 1, no entanto, estes dois ensaios apresentaram valores muito semelhantes de

CC global no final da 1ª iteração. Detalhadamente, verifica-se que os ensaios 2, 4 e 6 foram os que apresentaram uma evolução mais significativa e acentuada entre a iteração inicial e a 2ª iteração, atingindo valores médios de CC global a variarem cerca de 0,3, ao contrário dos ensaios 1 e 5 onde as evoluções foram mais suaves. Apesar de o ensaio 5 ter obtido o valor inicial de CC global mais elevado, comparativamente com os ensaios 2, 4 e 6 (excluindo à partida os ensaios 1 e 3), após a 2ª iteração, apresentou um comportamento de evolução praticamente igual ao do ensaio 4 e inferior aos ensaios 2 e 6 (melhores ensaios GEI). Tal como foi referido na discussão anterior dos ensaios GSI, entre a iteração inicial e a 2ª iteração, o processo de inversão sísmica dos ensaios 2 e 6, nesta metodologia GEI, gerou melhores volumes auxiliares de IA e IE que permitiram uma melhor convergência e consequentemente uma melhor correlação global final (comparando com o ensaio 5). O ensaio 2, que se verificou o melhor ensaio, foi o que apresentou uma maior variação na evolução dos valores de CC global, num intervalo de cerca de 0,60 unidades, durante todo o processo de inversão.



**Figura 73:** Representação gráfica da evolução dos coeficientes de correlação global relativos aos ensaios médios do método GEI.

Uma vez mais fica claro que a criação de zonalidades no modelo de reservatório permite aumentar a convergência do método de inversão elástica em estudo. Para casos em que a estacionaridade não se verifica para toda a área de estudo, a divisão da malha do reservatório em zonas aumenta assim drasticamente a performance da metodologia.

O ensaio 1, que apresentava apenas uma zona, e o ensaio 4, com uma zona de reservatório e outra de não-reservatório, obtiveram valores mais baixos de CC global, uma vez que as divisões definidas para estes ensaios, relativamente a este modelo original de IA, não favoreceram para uma melhor caracterização espacial das propriedades de impedância elástica. O ensaio 3 (três divisões, ver Figura 25) apresentou um valor muito baixo (em relação aos restantes ensaios), uma vez que tinha a zona de reservatório mais ajustada e a divisão foi definida através do modelo original de IA. Por sua vez, o ensaio 2 beneficiou da zona de reservatório menos ajustada, essencialmente, devido ao facto da inversão sísmica geoestatística GEI abranger também as distribuições relativas à propriedade de impedância elástica dos dados dos *logs* dos poços condicionantes. O ensaio 5, dividido em quatro zonas (duas na área de reservatório) revelou-se mais eficaz que os ensaios 1 e 3, no entanto obteve CC globais ligeiramente inferiores aos ensaios 2 e 6. Por fim, relativamente ao ensaio 6, justificou-se novamente a divisão em mais zonalidades (nove zonas uniformemente divididas), apresentando uma diferença residual no CC global, comparando com o melhor ensaio com GEI (ensaio 3).

### **5.3 Comparação e discussão de resultados entre os métodos geoestatísticos GSI e GEI**

Neste subcapítulo são discutidos os resultados finais obtidos através das duas metodologias geoestatísticas utilizadas e entre os dois melhores ensaios GSI e GEI.

Atendendo às representações das evoluções dos valores de CC global das corridas médias dos ensaios GSI e GEI (Figura 66 e Figura 73), verifica-se que os CC global médios dos ensaios GSI foram sempre superiores aos valores médios obtidos dos ensaios GEI, após as simulações de modelos no final da 1ª iteração. Os ensaios GEI foram no entanto os que, maioritariamente, obtiveram maior evolução de CC global médios, desde a iteração inicial até ao final da inversão, variando cerca de 0,50. Apesar

de os seis ensaios para as duas metodologias se basearem em critérios de zonalidades diferentes, verificam-se algumas uniformidades de um método para o outro:

- O modelo original de IE é muito mais complexo que o modelo original de IA. Deste modo deveria ter-se recorrido a uma divisão de zonas diferentes para a GSI e para a GEI;

- A convergência da metodologia GEI é sempre menor que a da GSI uma vez que a metodologia tem que convergir simultaneamente para todos os *partial angle stacks* em estudo;

- Os ensaios 4 e 5 apresentaram-se como aproximações razoáveis, obtendo CC global médios razoáveis e mais próximos dos valores dos melhores ensaios, do que dos menos aproximados;

- O ensaio 1 foi o único que apresentou apenas uma zonalidade, condicionado apenas por distribuições globais do valor das propriedades, fator determinante para uma menor aproximação aos modelos originais e obtenção dos valores médios mais baixos de CC global;

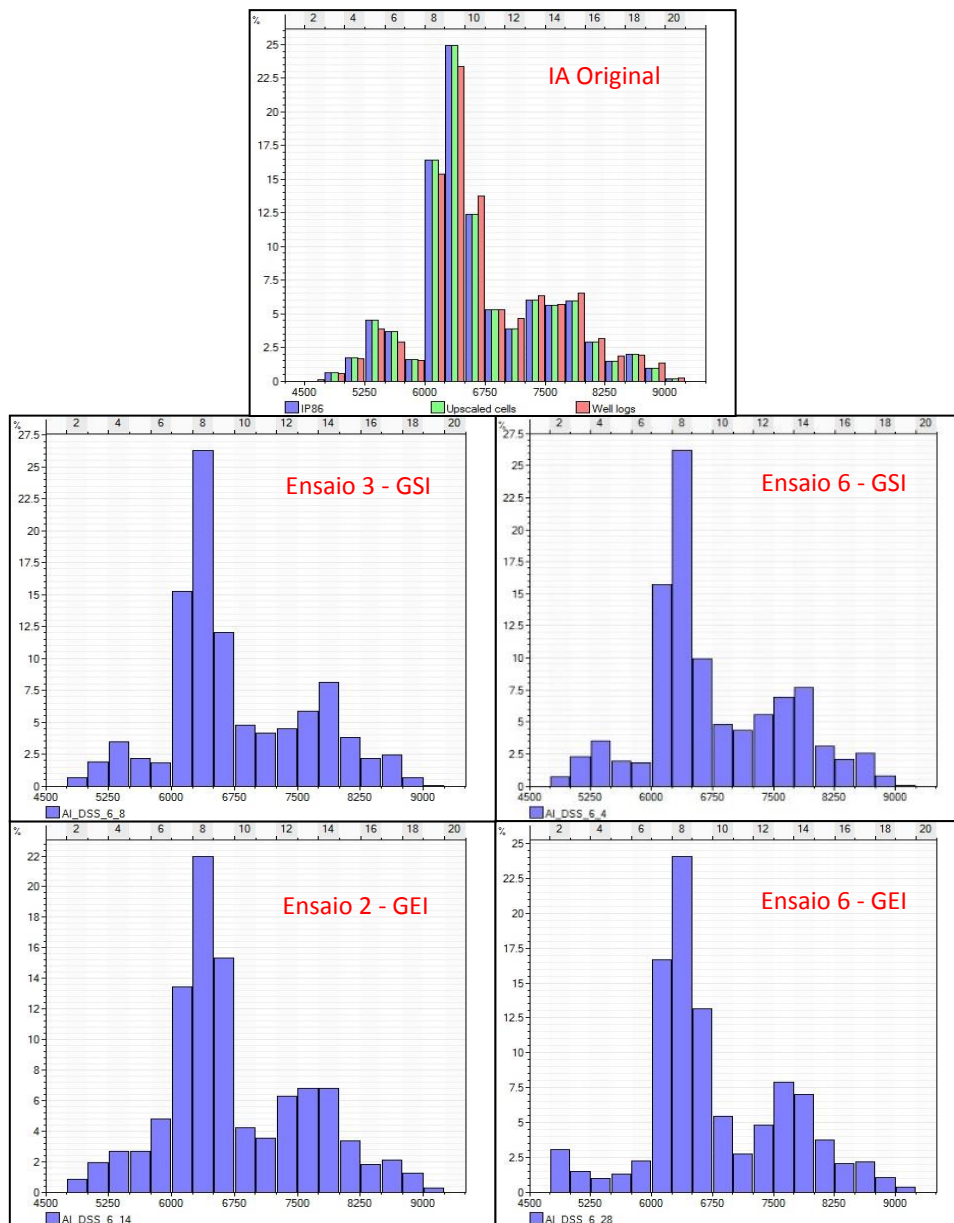
- O ensaio 6 foi o que apresentou de CC global médios mais elevados, apesar de quantitativamente não o ter sido, no entanto apresentou apenas diferenças residuais perante os melhores ensaios GSI e GEI oficiais, obtendo mais concretamente os valores finais médios de 0,894 e 0,882 respetivamente.

Para uma melhor discussão e respetivas conclusões finais sobre as diferenças entre as metodologias GSI e GEI, apresenta-se uma comparação entre resultados sintéticos e os dados originais dos dois melhores ensaios. Esta comparação foi apenas a nível da propriedade de IA, uma vez que é a única propriedade de poço comum às duas metodologias GSI e GEI. Atendendo à comparação dos histogramas, da Figura 74, verifica-se que os dois melhores modelos, relativos a ambos os métodos utilizados, apresentam classes de distribuição de valores de IA muito boas. Ainda assim, as classes de distribuição de valores baixos e altos de IA estão melhor representadas nos dois ensaios GSI.

Os ensaios 2 e 3 apresentaram comportamentos opostos de uma metodologia para a outra, passando de melhor ensaio para o segundo ensaio menos aproximado com o modelo real: o ensaio 3 foi o melhor ensaio GSI, apresentando-se como penúltimo ensaio

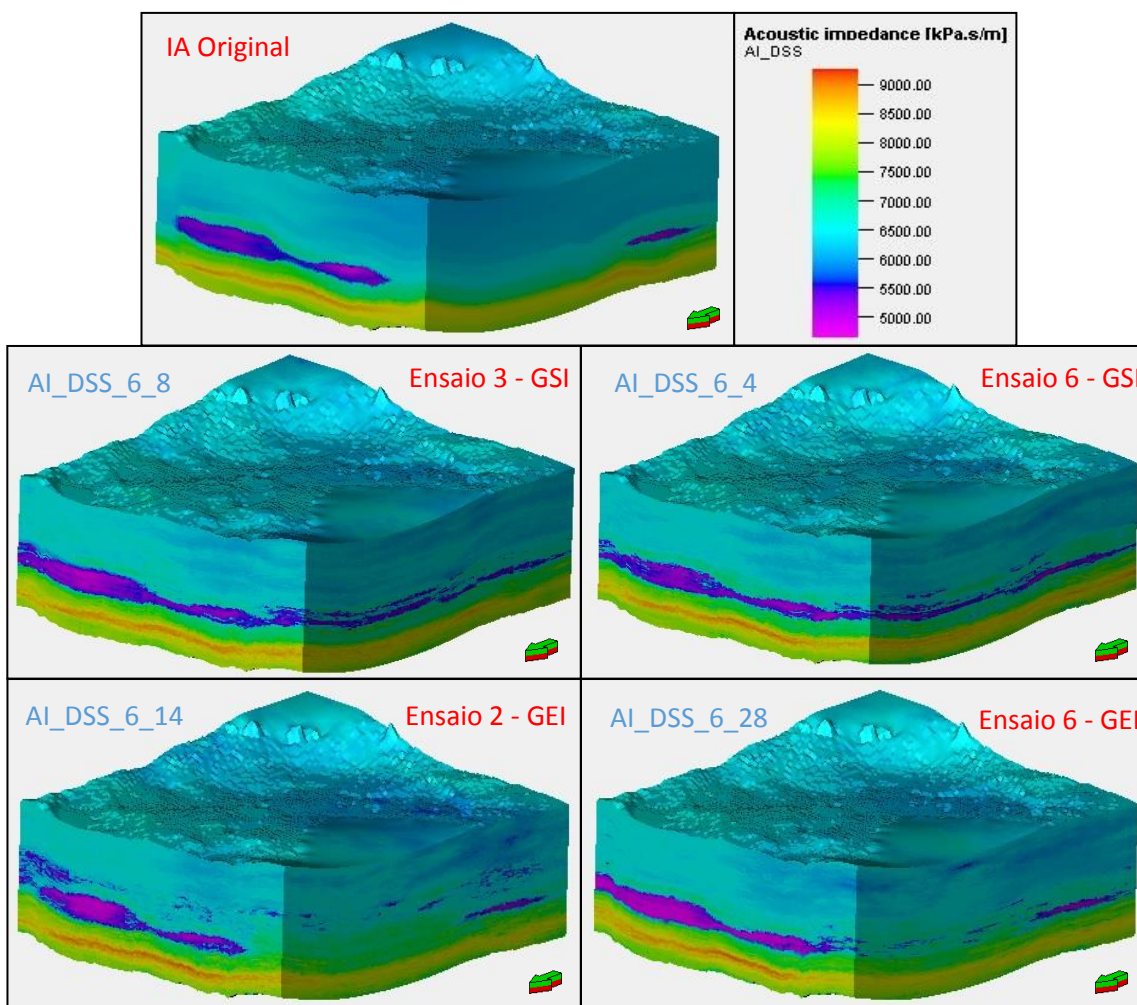


GEI; o ensaio 2, que foi o melhor ensaio GEI, apresentou-se como o penúltimo ensaio GSI. Este comportamento é justificado pelo facto de a divisão em zonalidades dos seis ensaios ter tido como base o modelo original de IA. Isto é, o ensaio 3, dividido em três zonas (com a zona de reservatório mais ajustada) beneficiou a metodologia GSI, uma vez que o processo de inversão é apenas condicionado pela propriedade IA; o ensaio 2, dividido em três zonas uniformes, obteve uma correlação menos eficaz na metodologia GSI; no entanto beneficiou no condicionamento de ambas as propriedades através do método GEI, visto que apresentava a zona de reservatório menos ajustada (ver seções dos modelos originais de IA e IE, Figura 45 e Figura 47, respetivamente).

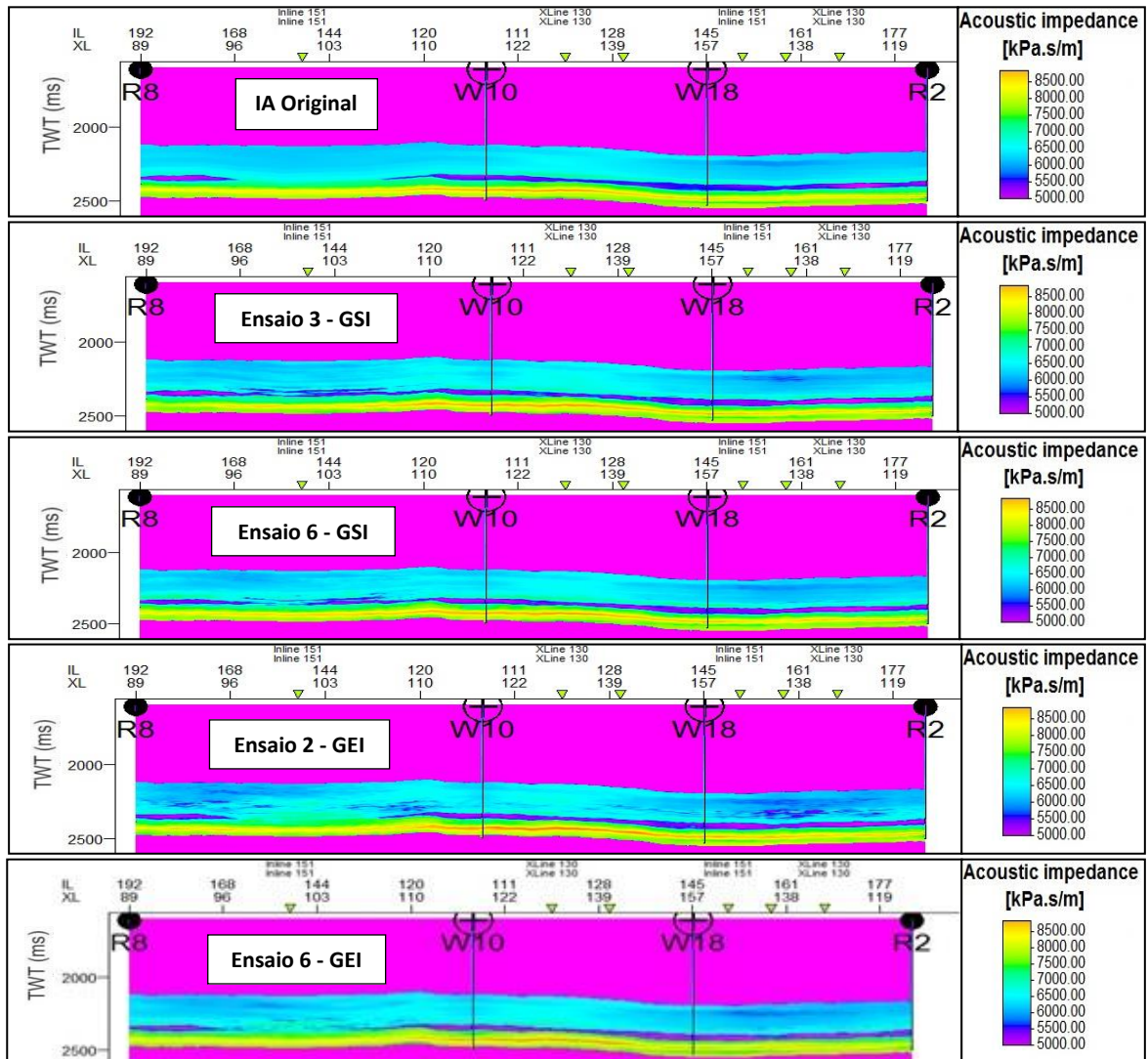


**Figura 74:** Comparação entre o histograma do modelo original de IA e os histogramas relativos aos dois melhores modelos dos ensaios GSI e GEI.

Contudo, foram os dois ensaios GEI que apresentaram uma melhor aproximação e representação espacial destes baixos e altos valores de IA (essencialmente os valores mais baixos) na definição e geometria do reservatório, como se pode verificar na Figura 75 e Figura 76. Por outro lado, é também visível, nos modelos e seções verticais, que os dois ensaios GSI obtiveram uma melhor distribuição espacial (comparando com o modelo original de IA) nas áreas acima e abaixo da zona de reservatório. Esta representação mais aproximada da zona do reservatório, através dos ensaios GEI, deve-se ao facto de o *hard data* da metodologia GEI integrar dados e informação dos poços, relativos a duas propriedades (IA e IE). No entanto, este facto também implica uma menor convergência da metodologia utilizada, comparativamente com o método de inversão GSI (que apenas integra os dados de poço relativos a IA).



**Figura 75:** Comparação entre o modelo original de IA e os modelos simulados relativos aos dois melhores modelos dos ensaios GSI e GEI.



**Figura 76:** Comparação entre a seção vertical do modelo original de IA e as seções verticais dos modelos simulados relativos aos dois melhores modelos dos ensaios GSI e GEI.

## 5.4 Conclusões Finais e Sugestões de Trabalho Futuro

Neste ultimo sub-capítulo são apresentadas as conclusões finais da elaboração deste trabalho científico, juntamente com umas possíveis sugestões de trabalho futuro, de forma a dar continuidade ao trabalho desenvolvido nesta tese.

Claramente que a zonalidade dos diferentes modelos dos ensaios é um fator muito importante para uma melhor aproximação dos modelos sintéticos aos modelos reais (dados dos *logs* dos poços). Assim, torna-se vantajoso dividir em zonas de forma a reduzir a incerteza espacial e a heterogeneidade do bloco, em zonas localmente mais uniformizadas, ou estacionárias. Apesar dos resultados muito bons que se obtiveram com a divisão em nove zonalidades uniformes (ensaio 6), em ambas as metodologias de

inversão sísmica condicionadas pelas nove multi-distribuições locais, uma maior divisão por zonalidades nem sempre é proporcional a uma melhor convergência da metodologia utilizada. Claramente e, em casos mais extremos, a divisão num considerável número de zonas, pode mesmo influenciar de forma negativa os resultados. Isto deve-se ao facto de as distribuições nos poços serem sempre ligeiramente enviesadas, o que leva a que, nestes casos mais extremos, obter-se uma zona muito pequena em que os dados experimentais não representem os valores das propriedades originais de poço, ou seja, iria haver uma escassez de dados de forma a obter uma boa distribuição para condicionar a simulação estocástica.

Assim, e de forma a diminuir a incerteza espacial associada aos modelos gerados, a utilização de ambas as metodologias geoestatísticas de inversão sísmica (GSI e GEI) pode ser muito benéfica, visto apresentarem algumas diferenças nos seus resultados. A integração e análise dos resultados sintéticos de ambos os métodos conduz a uma melhor e mais detalhada aproximação aos dados originais de poço, premissas vantajosas para uma melhor interpretação e correlação da distribuição espacial das zonas de interesse dos diversos modelos simulados.

Relativamente aos resultados das duas metodologias de inversão sísmica, independentemente do diferente tipo de zonalidade aplicada, verifica-se que uma correcta divisão do modelo original em *overburden*, reservatório e *underburden* (como o caso do ensaio 6, mais constante nos dois métodos de inversão sísmica) permite aumentar o coeficiente de correlação global em 0.2 relativamente ao ensaio sem divisão de zonas (ensaio 1). Assim, através da análise da evolução dos coeficientes de correlação ao longo do processo iterativo, torna-se evidente que a definição de zonas, ou de momentos estatísticos de estacionaridade, é um factor de extrema importância na convergência deste tipo de metodologias de inversão geoestatísticas.

Considerando, por exemplo, uma determinada situação real em que apenas estão disponíveis os dados dos *logs* de poços e os dados de reflexão sísmica registados; isto é não havendo acesso à informação dos modelos reais de impedâncias acústica e elástica para se poder determinar o número de divisões em zonas a condicionar o processo de inversão. Devido à elevada incerteza associada, acerca da geologia de sub-superfície, independentemente da sua complexidade e heterogeneidade (cujas propriedades são altamente não-estacionárias), a solução de divisão em diferentes zonalidades torna-se uma mais-valia para uma melhor caracterização de reservatórios de hidrocarbonetos,

através da divisão em áreas mais estacionárias (homogêneas), comparativamente com uma zona global (menos estacionária).

Como trabalho futuro, no seguimento do tema abordado nesta dissertação, propõem-se dois objetivos de forma a complementar o trabalho desenvolvido nesta tese. O primeiro seria a elaboração de mais dois ensaios baseados na geração de superfícies. Estas superfícies corresponderiam à zona de reservatório e à camada (*layer*) que apresenta valores altos de impedância acústica (abaixo do reservatório). Ambos os ensaios seriam divididos em três zonas com superfícies: um deles apresentaria as três zonas correspondendo, respetivamente, à área acima do reservatório, o reservatório (superfície) e a área abaixo do reservatório; o outro utilizaria as duas superfícies (área de reservatório e *layer* abaixo) como duas zonas, correspondendo a área restante (de valores médios de *IA*) do modelo à terceira e última zona. Os resultados destes dois ensaios seriam, posteriormente comparados, com os resultados obtidos nos seis ensaios desta dissertação. Por fim e como último objetivo, propõe-se a elaboração dos mesmos ensaios, para ambas as metodologias de inversão utilizadas, no entanto com dados condicionados por um conjunto menor de *hard data*. Ou seja, o processo de inversão realizar-se-ia com menor quantidade de dados das propriedades, removendo-se gradualmente o número de poços a condicionar (nesta tese foram utilizados 32 poços). Obviamente que os resultados, a um certo nível, seriam menos aproximados comparativamente com os resultados apresentados neste trabalho e com os dados originais, uma vez que a informação do conjunto de dados de *log* dos poços é menor. Seria no entanto bastante interessante discutir e comparar os resultados futuros com os que os resultados que foram desenvolvidos e apresentados nesta dissertação.



# **Referências Bibliográficas**





- Andriotti, J. L. S., 1989. "Introdução à Geoestatística". *Acta Geológica Leopoldensia*, v. 11, n.27, pp.16-26.
- Azevedo, L., Nunes, R. F., Almeida, J. A., Pinheiro, L. M., Correia, P. J., & Soares, A. 2012. "Seismic Attributes for Constraining Geostatistical Seismic Inversion". *Ninth International Geostatistics Congress*. Oslo, Norway.
- Azevedo, L. 2013. "Geostatistical methods for integrating seismic reflection data into subsurface Earth models". Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- Bosch, Miguel, Tapan Mukerji, and Ezequiel F. González. 2010. "Seismic Inversion for Reservoir Properties Combining Statistical Rock Physics and Geostatistics: A Review." *Geophysics* 75 (5): 75A165. doi:10.1190/1.3478209.
- Caers, Jef. 2011. "Modeling Uncertainty in Earth Sciences". UK: Wiley-Blackwell.
- Caetano, Hugo. 2009. "Integration of Seismic Information in Reservoir Models: Global Stochastic Inversion". Instituto Superior Técnico/Universidade Técnica de Lisboa.
- Deutsch, C., and A.G. Journel. 1998. *GSLIB: Geostatistical Software Library and Users' Guide*. Oxford University Press.
- Doyen, P M. 2007. *Seismic Reservoir Characterization*. EAGE.
- Fatti, Jan L., George C. Smith, Peter J. Vail, Peter J. Strauss, and Philip R. Levitt. 1994. "Detection of Gas in Sandstone Reservoirs Using AVO Analysis: A 3-D Seismic Case History Using the Geostack Technique." *Geophysics* 59 (9) (September): 1362–1376. doi:10.1190/1.1443695.
- Francis, A. M. 2005. "Limitations of Deterministic and Advantages of Stochastic Seismic Inversion". *CSEG Recorder*.
- Francis, A. M. 2006. "Understanding Stochastic Inversion: Part 1." *First Break* 24 (November): pp. 79–84.
- Goovaerts, Pierre. 1997. "Geostatistics for Natural Resources and Evaluation. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*". Oxford University Press.

Horta, A., & Soares, A. 2010. "Direct Sequential Co-simulation with Joint Probability Distributions". *Mathematical Geosciences*, pp. 262-292.

Huijbregts, C.J. 1975. "Regionalized variables and quantitative analysis of spatial data." In: Davis, J.C. & McCullagh, M.J. (ed) *Display and analysis of spatial data*. New York, John Wiley. p.38-53.

Matheron, G. 1965. "Les Variables Régionalisées et Leur Estimation."

Nunes, R. F. 2008. "Paralelização dos Algoritmos Simulação Sequencial Gaussiana, Indicatriz e Directa". MSc, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Nunes, R. F., Soares, A., Schwedersky, G., Dillon, L., Guerreiro, L., Caetano, H., Maciel, C. & Leon, F. 2012. "Geostatistical Inversion of Prestack Seismic Data." In *Ninth International Geostatistics Congress*, pp. 1–8. Oslo, Norway.

Soares, A. 2001. "Direct Sequential Simulation and Cosimulation. *Mathematical Geology*", Vol. 33, No. 8, pp. 911-926.

Soares, Amílcar. 2006. "Geoestatística Para as Ciências Da Terra e Do Ambiente". IST Press.

Soares, A., Diet, J., & Guerreiro, L. 2007. "Stochastic Inversion with a Global Perturbation". *Petroleum Geostatistics 2007*. Cascais, Portugal: EAGE.

Tarantola, Albert. 2005. *Inverse Problem Theory*. SIAM.

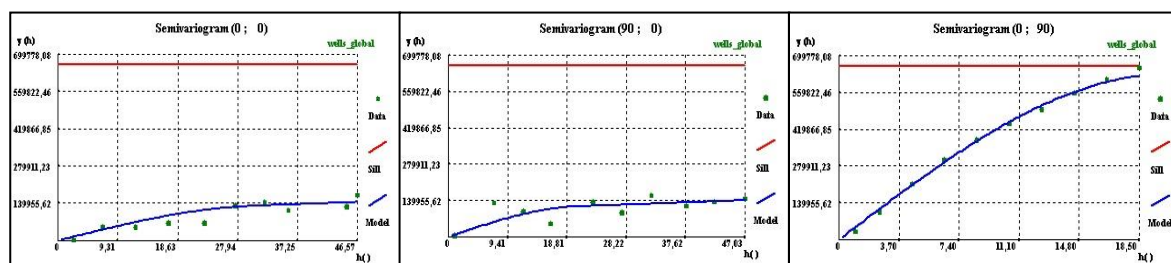
Tompkins, Michael J., Juan L Fernández Martínez, David L Alumbaugh, and Tapan Mukerji. 2011. "Scalable Uncertainty Estimation for Nonlinear Inverse Problems Using Parameter Reduction, Constraint Mapping, and Geometric Sampling: Marine Controlled-Source." *Geophysics* 76 (4): 263–281.

**Anexos**

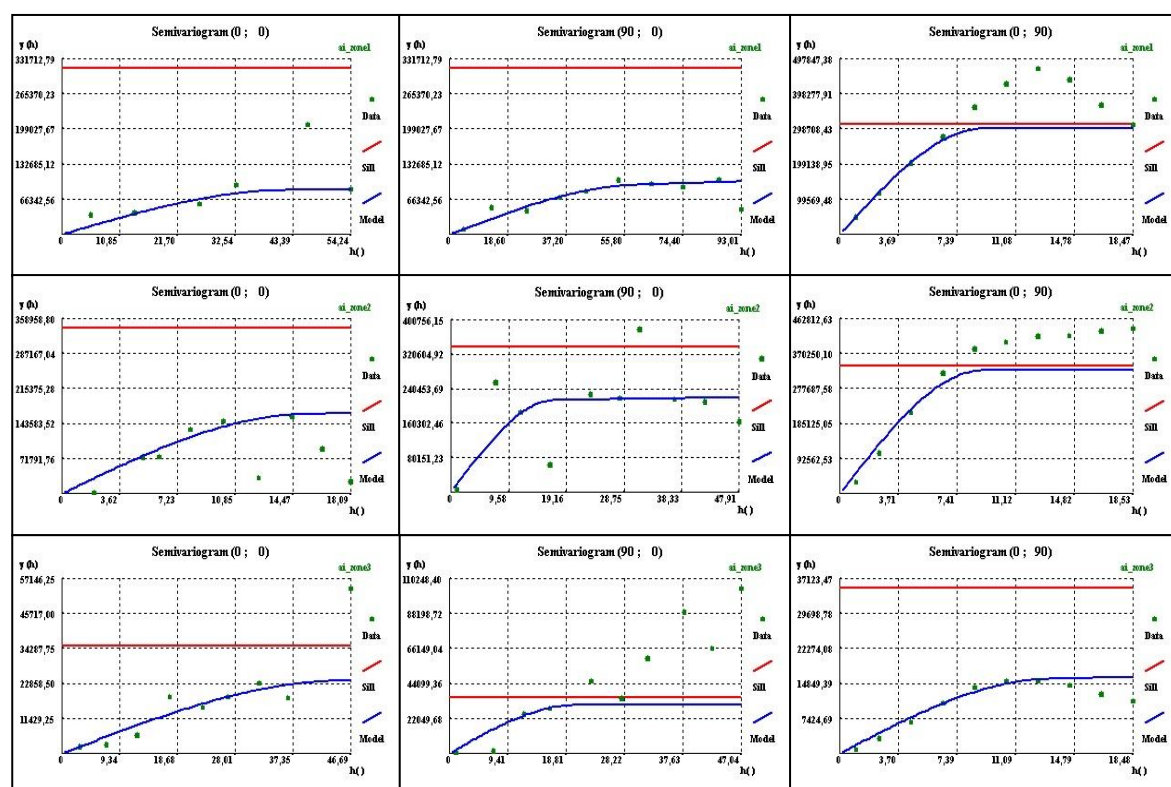


# Anexo I – Variogramas das Zonas: Ensaios GSI

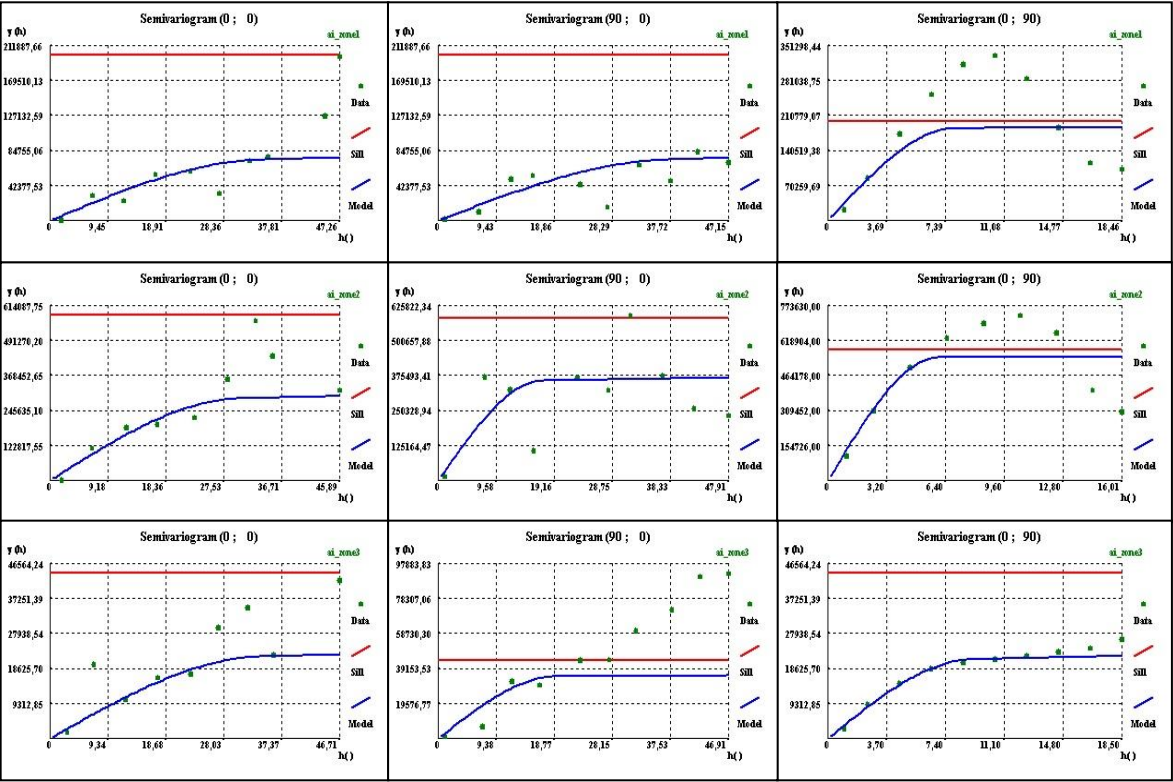
## Ensaio 1:



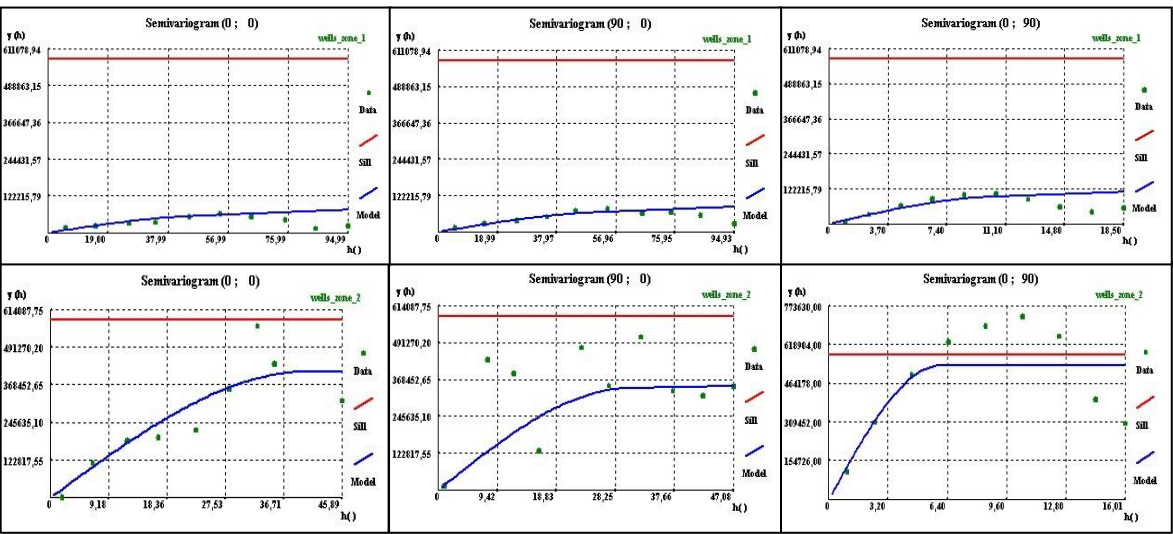
## Ensaio 2:



Ensaio 3:

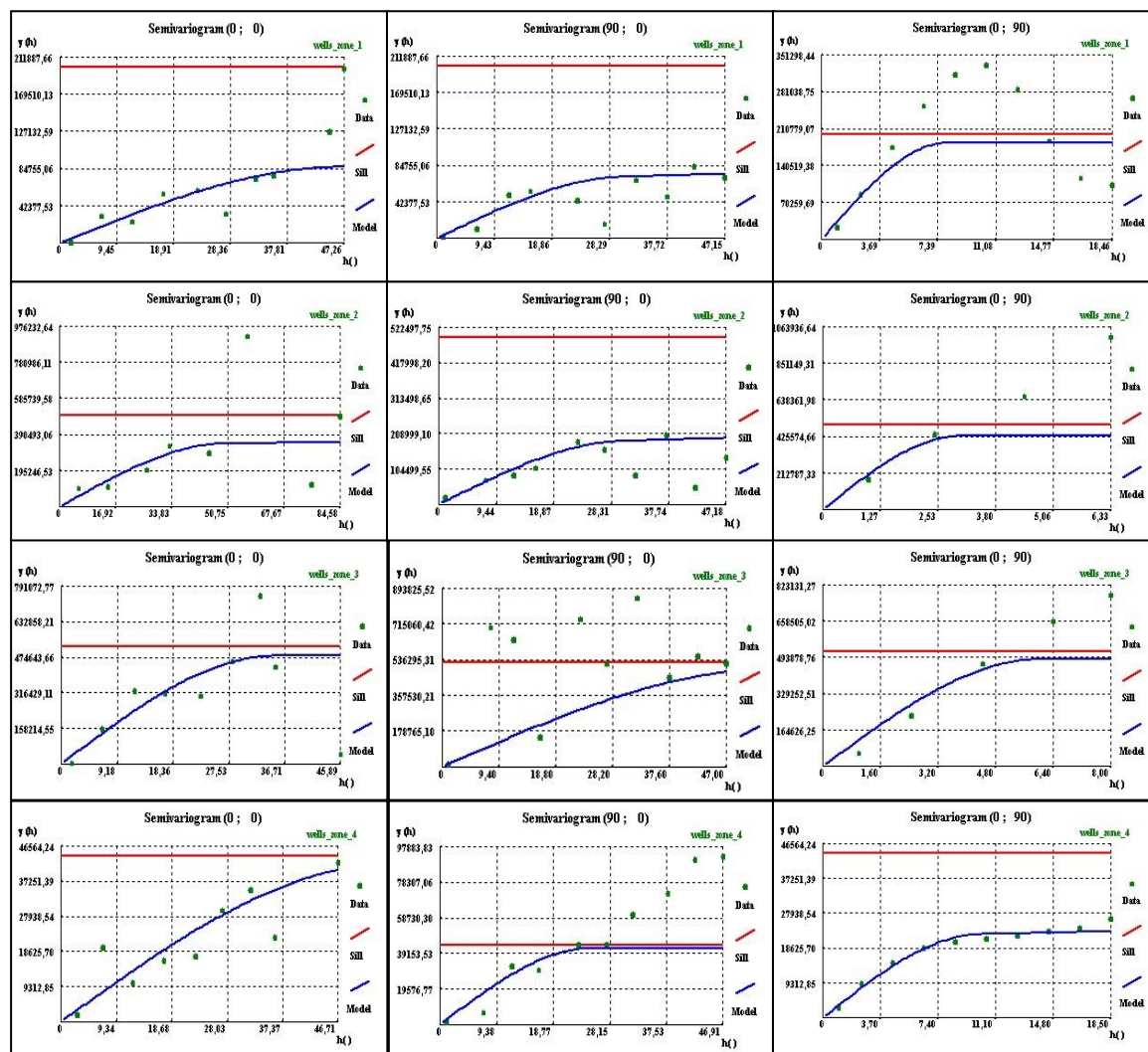


Ensaio 4:

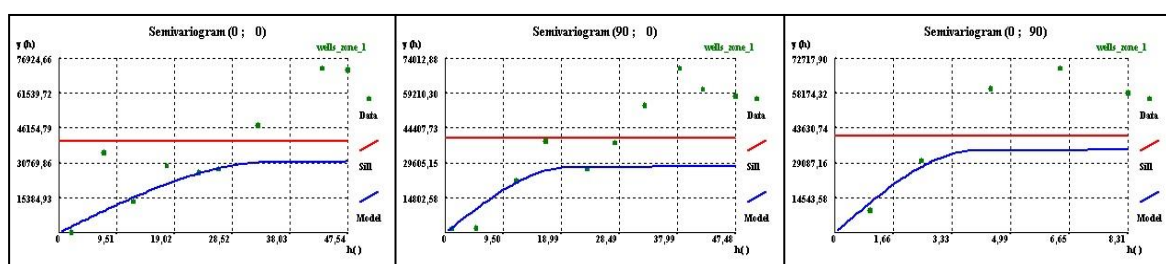


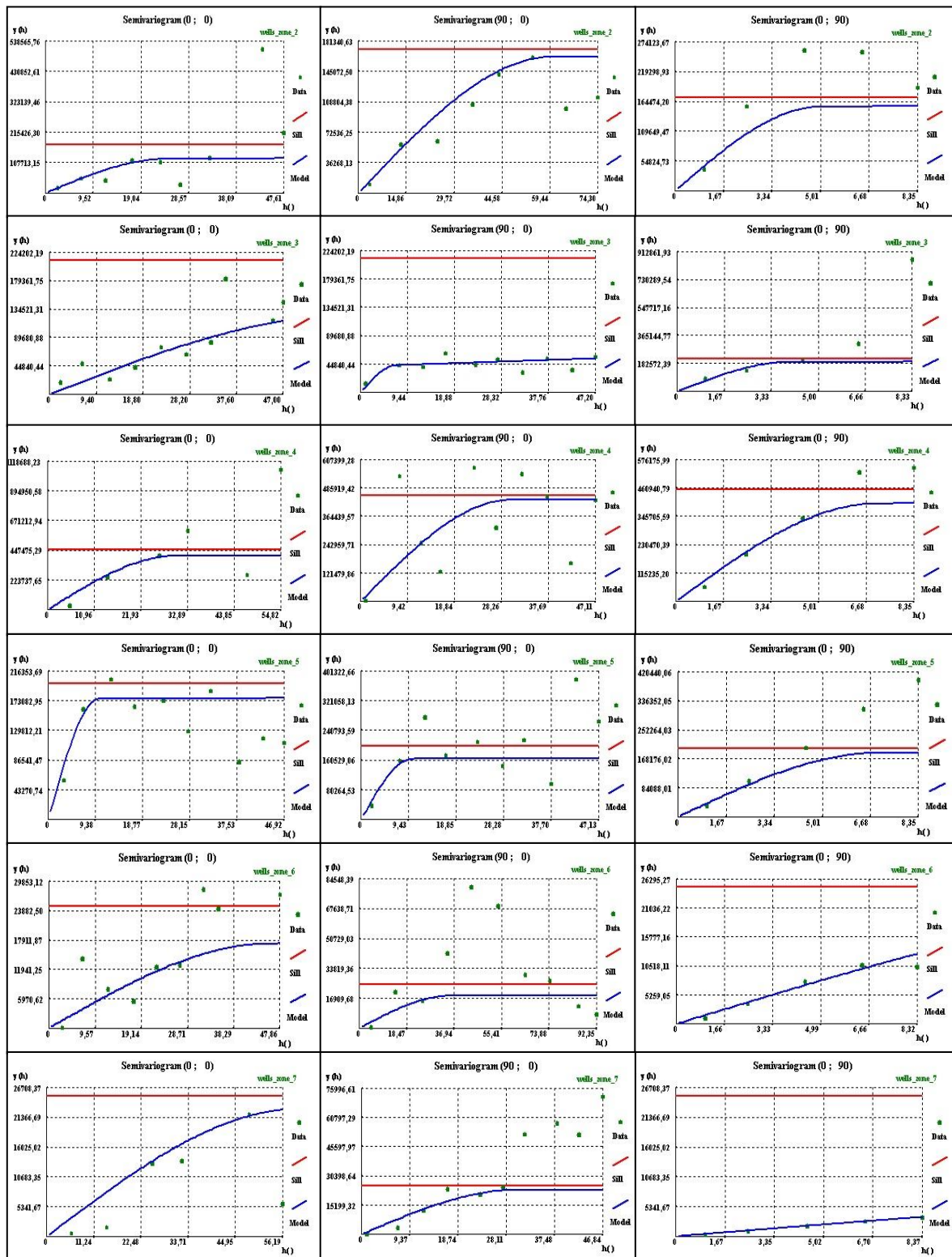


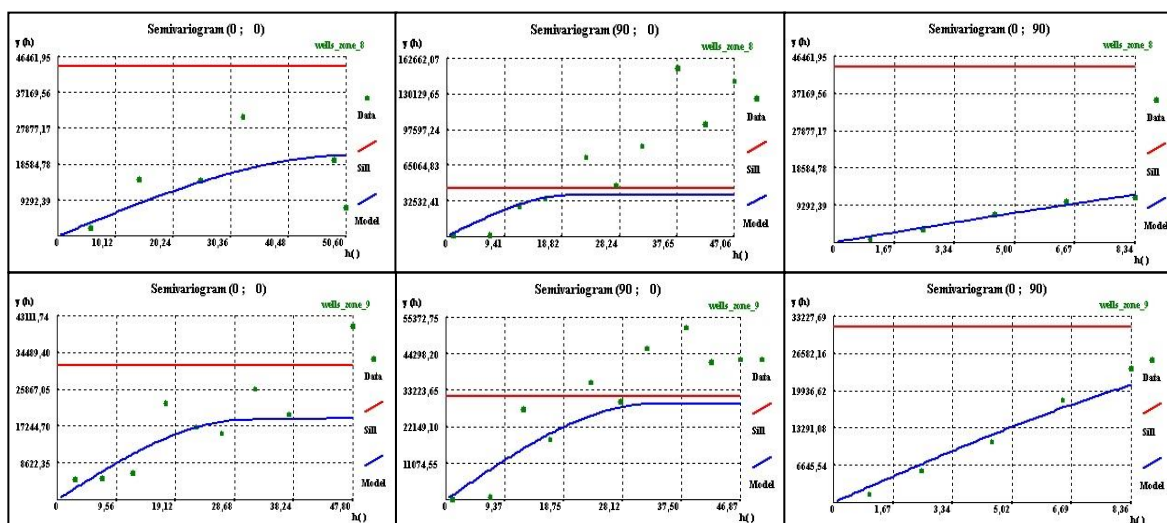
## Ensaio 5:



## Ensaio 6

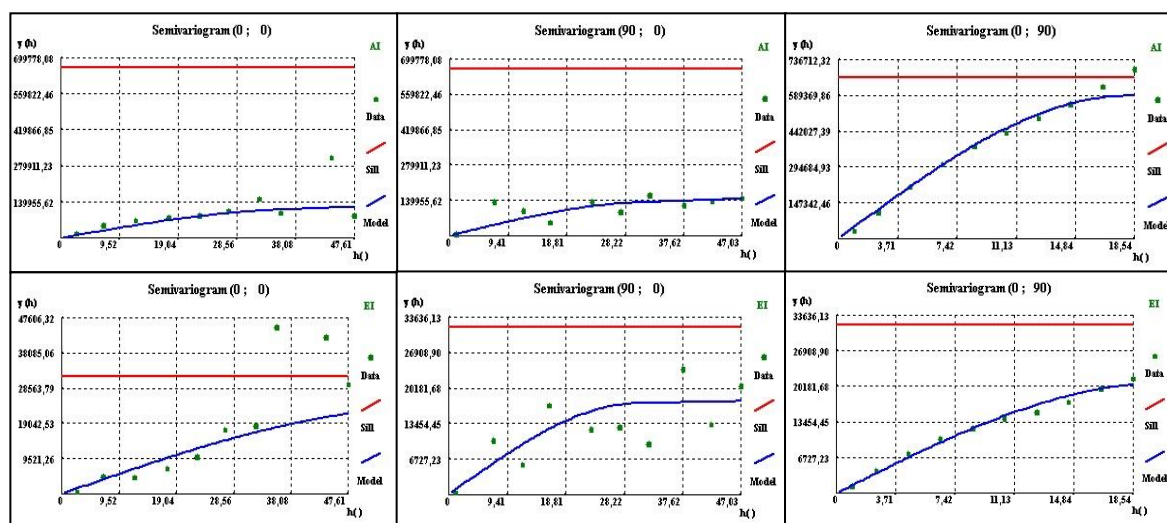




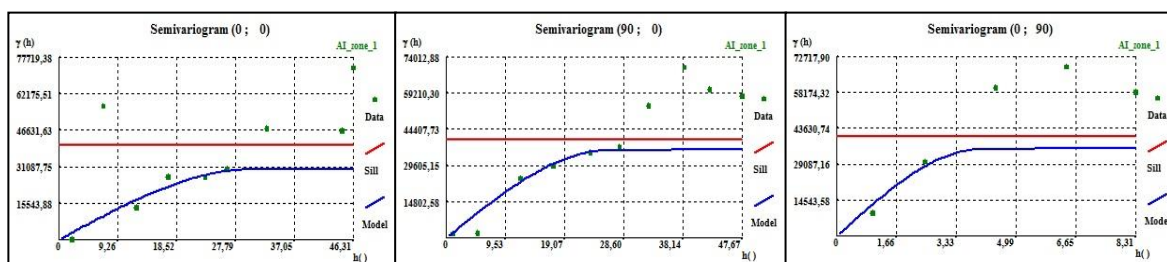


## Anexo II – Variogramas das Zonas: Ensaios GEI

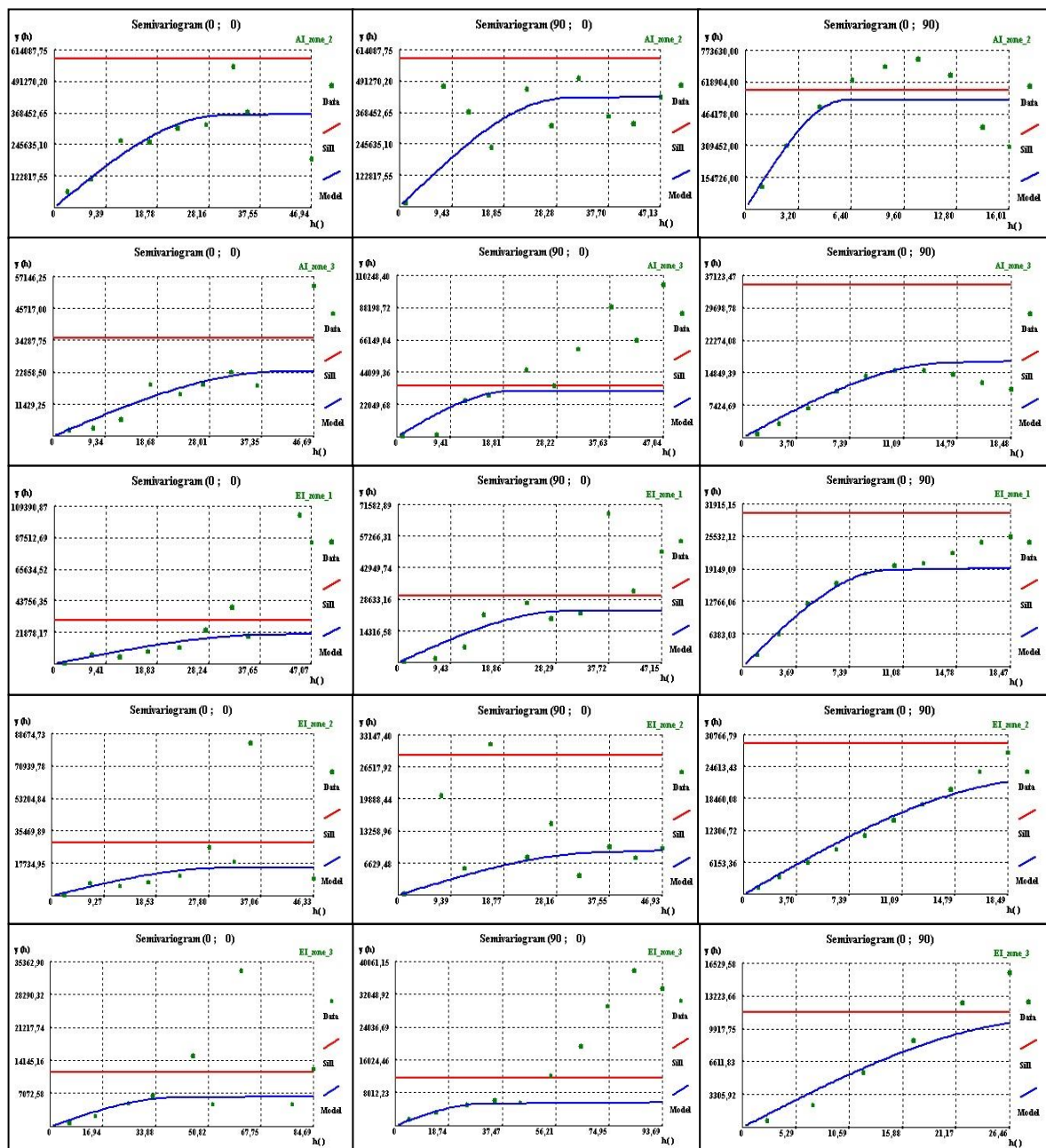
### Ensaio 1:



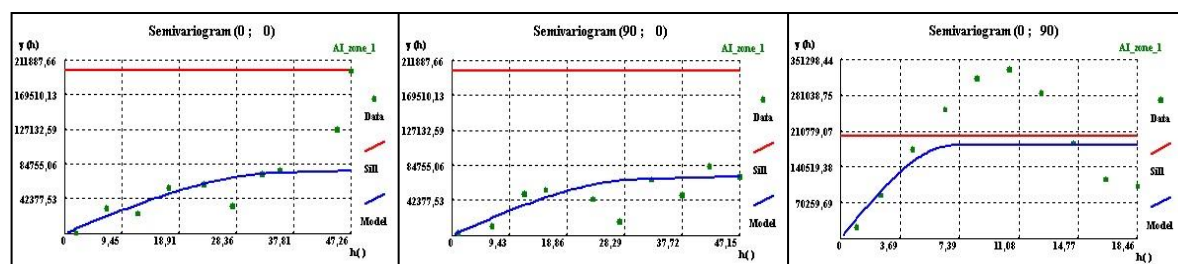
### Ensaio 2:

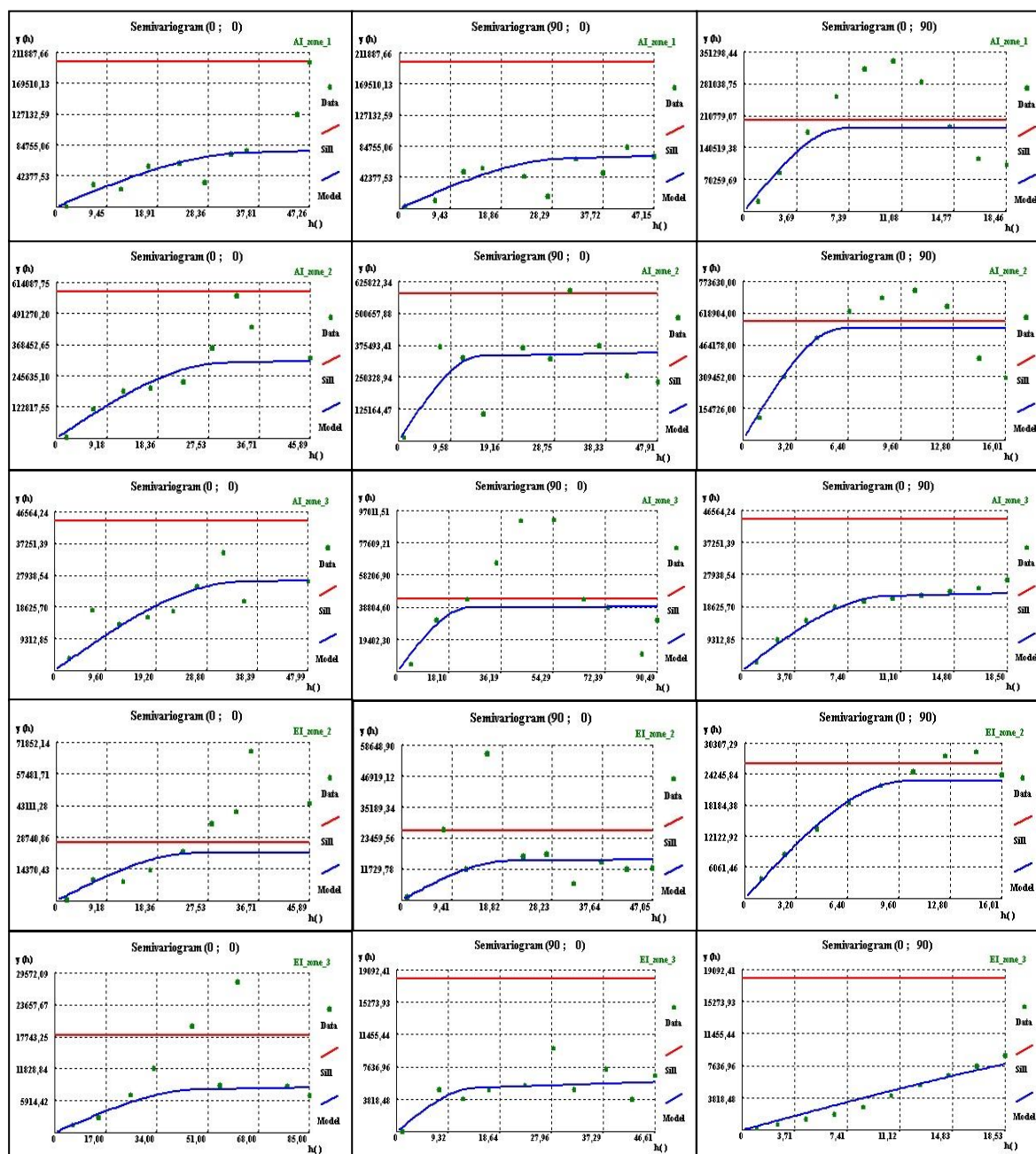




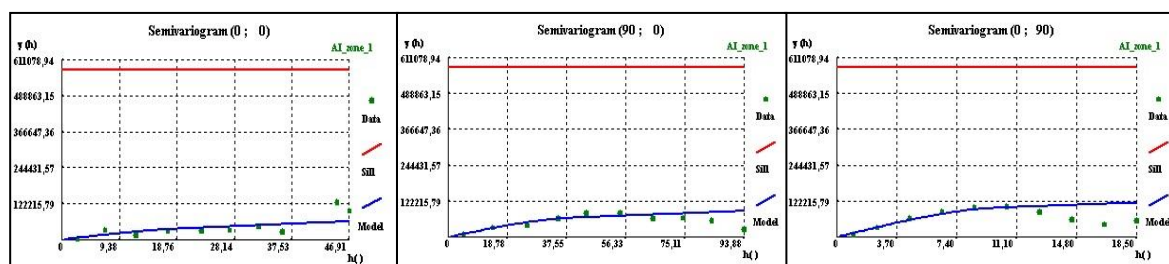


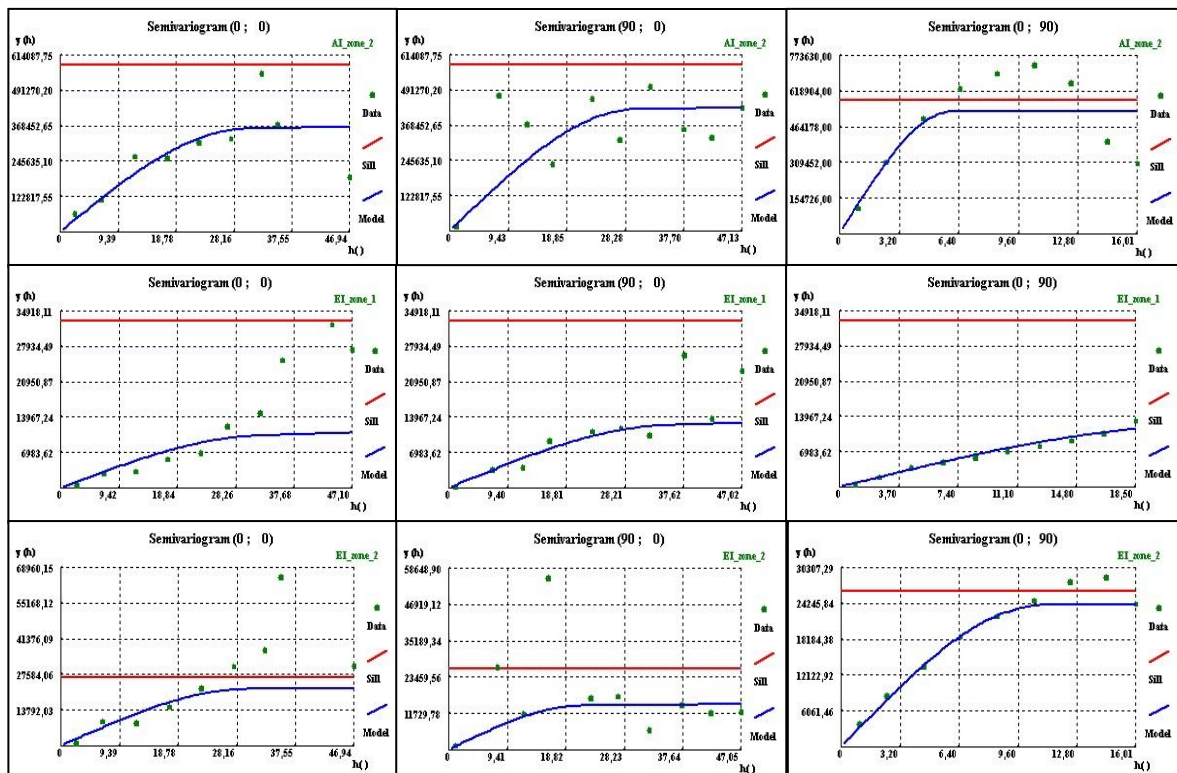
### Ensaio 3:



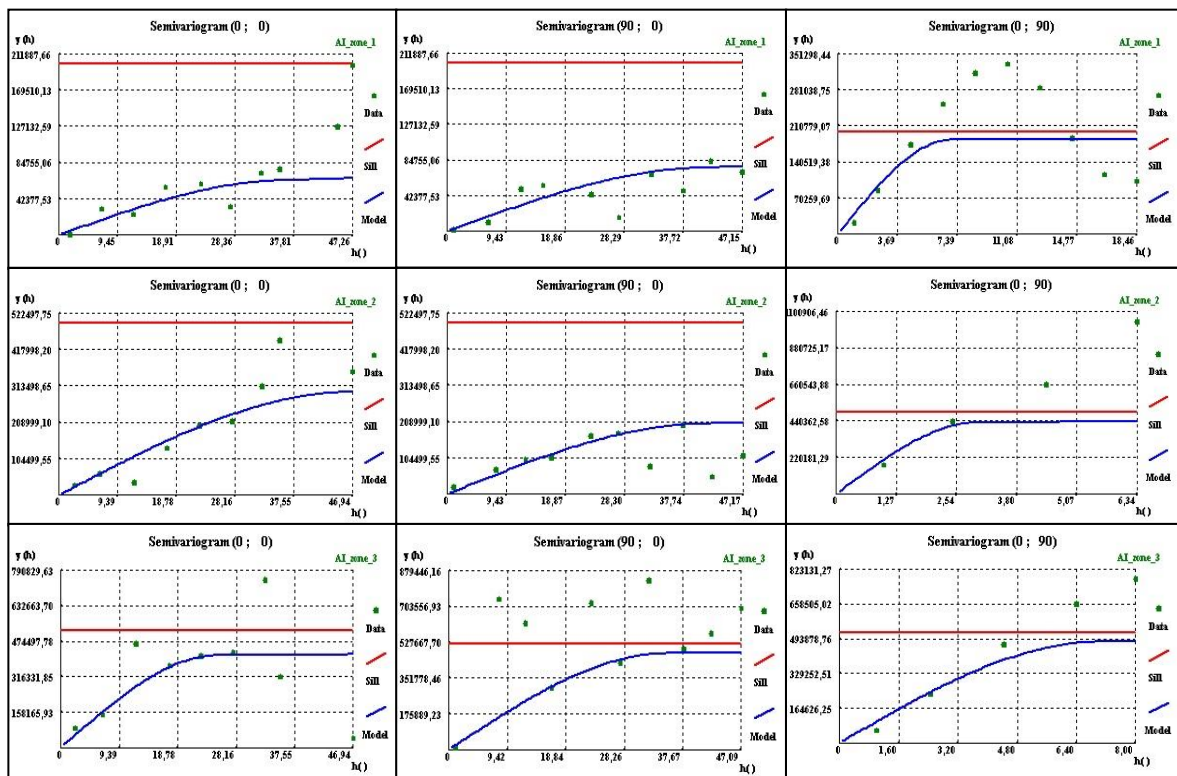


## Ensaio 4:

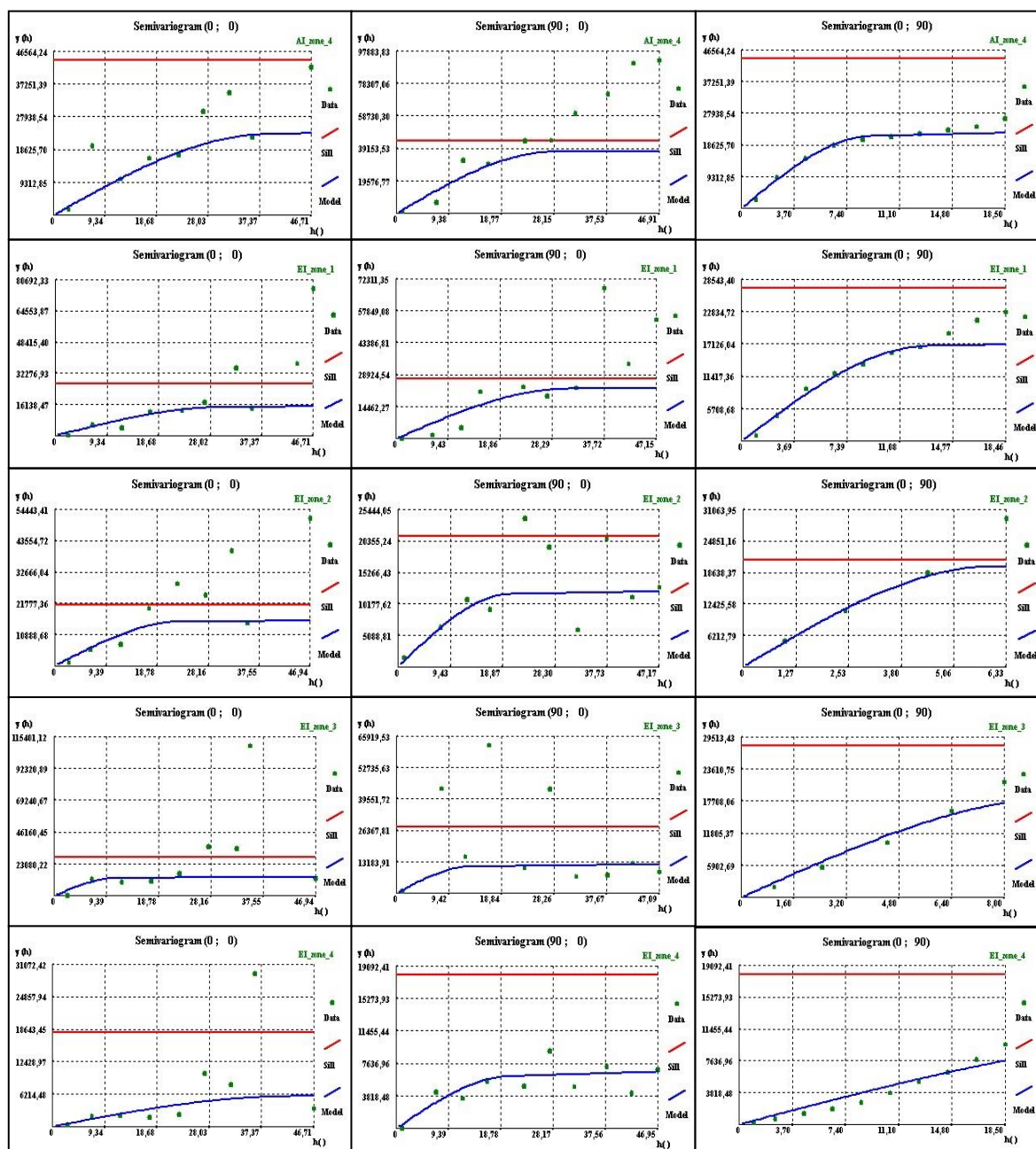




## Ensaio 5:







## Ensaio 6:

